DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C **Dissertationen** **Heft Nr. 608**

Christian Hesse

Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern

München 2007

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

ISSN 0065-5325 **ISBN 3 7696 5047 6**

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 268, Hannover 2008

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 608

Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Hesse

München 2007

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325 | ISBN 3 7696 5047 6

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 268, Hannover 2008

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 ● Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283/ - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de ● http://dgk.badw.de

Prüfungskommission

Referent:	Univ.Prof. Dr.-Ing.habil. Hansjörg Kutterer
Korreferenten:	Univ.Prof. Dr.-Ing.habil. Christian Heipke
	Univ.Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand

Tag der mündlichen Prüfung: 31.08.2007

© 2007 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325 ISBN 3 7696 5047 6

Kurzfassung

Seit jeher gehört die Erfassung der Erdoberfläche und der mit ihr verbundenen Topographie zu den zentralen Aufgaben der Geodäsie. Im Zuge der fortschreitenden Verbreitung von Informationstechnologien und der damit einhergehenden Digitalisierung von Geodaten besteht sowohl in der öffentlichen Verwaltung als auch bei privaten Anwendern von Geoinformationssystemen sowie Polizeidienststellen und Gerichten ein erhöhter Bedarf an digitalen Daten. Die für eine flächenhafte Erfassung von Umgebungen im Außenbereich entwickelten Mobile-Mapping-Systeme besitzen verschiedene sensorische und auswertetechnische Nachteile, die einen wirtschaftlichen Einsatz der aktuell verfügbaren Systeme erschweren.
Terrestrische Laserscanner haben in der jüngsten Vergangenheit eine starke Verbreitung in der ingenieurgeodätischen Praxis gefunden und sind aufgrund ihres aktiv abtastenden Messprinzips in der Lage, eine Reihe der bestehenden Nachteile von Mapping-Systemen zu kompensieren. Zudem verwendet die Mehrzahl dieser Systeme inertiale Sensoren zur Bestimmung von Position und Orientierung, deren Einsatz mit hohen Kosten verbunden ist. Die Aufgabe dieser Arbeit besteht in der konzeptionellen Entwicklung und anschließenden Evaluierung eines Systems zur hochauflösenden Erfassung von Objekten im Außenbereich mit Hilfe eines profilmessenden terrestrischen Laserscanners unter Verzicht auf Inertialsensoren.
Der Einsatz eines profilmessenden Scanners auf einer bewegten Plattform führt zu einer helixförmigen Abtastung der Umgebung. Um Verzerrungen innerhalb der Punktwolke bei Kurvenfahrten zu vermeiden, müssen Position und Raumwinkel für jeden erfassten Scanpunkt bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Messrechner mit Echtzeitbetriebssystem dazu verwendet, die durch den Scanner erfassten Profildaten mit den Positionsmessungen eines GPS- oder GLONASS-Empfängers und den Neigungsdaten eines flüssigkeitsbasierten Inklinometers zu synchronisieren. Die hierdurch mögliche gegenseitige Referenzierung von Scanner- und GPS-Daten bildet die Grundlage für eine Bereinigung der erfassten Punktwolke um systematische Effekte, die durch den Einfluss der Fahrzeugbewegung entstehen.
Die zweite Besonderheit des entwickelten Konzeptes, die sich durch den Verzicht auf eine Inertialmesseinheit ergibt, besteht in der indirekten Ableitung der Raumwinkel aus den im Zustandsvektor enthaltenen Geschwindigkeitsvektoren. Diese können unter Verwendung eines kinematisch formulierten Kalman-Filters für jede Epoche und somit auch für jeden beliebigen Erfassungszeitpunkt der Scannerdaten prädiziert werden. Als Eingangsgrößen der Filterung dienen hierbei die kinematisch prozessierten Einzelpunktpositionen einer differentiellen GPS-Auswertung, für die eine virtuelle Referenzstation (VRS) des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) genutzt wird.
Aufgrund des erhöhten Messrauschens von GPS-Messungen mit kurzen Beobachtungszeiten wird die gefilterte Trajektorie zusätzlich durch einen Rauch-Tung-Striebel-Algorithmus geglättet, um die Homogenität der Punktwolke zu verbessern. Eine ausreichende Glättung der Trajektorie ist notwendig, da vergleichsweise geringe Abweichungen der Einzelpunkte, bedingt durch die Extrapolation des Azimutes auf entfernte Bereiche der Punktwolke, zu größeren Verzerrungen im Objektraum führen können.
Im Rahmen einer anschließenden Evaluierung werden verschiedene Messungen auf drei unterschiedlichen Testarealen durchgeführt, um eine konkrete Aussage über die erzielbaren Genauigkeiten des Messsystems, seiner Komponenten und die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu statischen Verfahren treffen zu können. Die hierbei festgestellten systematischen Effekte der durch GPS-Beobachtungen ermittelten Fahrzeugposition besitzen einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der abgeleiteten Azimute. Neben diesen bekannten Einflussgrößen führen auch hochfrequente Rollbewegungen der Testplattform zu nicht vollständig kompensierbaren systematischen Effekten in den ermittelten Raumwinkeln.
Trotz der durch diese Einflussgrößen hervorgerufenen Abweichungen können die an das System gestellten Genauigkeitsanforderungen zum Teil deutlich übertroffen werden. So besitzt die mit Hilfe von zwei gegenläufig erfassten Objektaufnahmen ermittelten relativen Genauigkeiten für die transformierte und um systematische Abweichungen korrigierte Punktwolke einen Wert von besser als 0.1 m. Auch die äußere Systemgenauigkeit in Form einer mittleren Abweichung, die über Messungen mit dem hochpräzisen SAPOS-GPPS-Dienst ermittelt werden kann, liegt in einem Bereich von deutlich unterhalb 0.1 m.
Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die hochauflösende Objekterfassung im mittleren Genauigkeitsbereich mit einem profilmessenden terrestrischen Laserscanner sowie geodätischen Standardsensoren auch unter Verzicht auf inertiale Messeinheiten möglich ist.

Stichworte: Laserscanning, kinematisch, terrestrisch, Echtzeit, Objekterfassung, Mobile Mapping, GPS, Imager, Punktwolke

Abstract

Ever since, the acquisition of the earth's surface and its topography has been one of the main tasks of geodesy. Due to the expansion of information technology and the related digitalisation of geospatial data, both public administration and private users of geoinformation systems as well as police authorities and courts have an increasing demand for geospatial data. The mobile-mapping-systems currently available on the market suffer from several sensor- and analysis-based disadvantages which impede a cost-efficient use.

Recently, terrestrial laser scanners have been spreading among the fields of engineering surveying. Because of their active sensing principle they are able to compensate some of the main drawbacks of current mobile-mapping-systems. Furthermore, the majority of these mapping systems use inertial sensors to determine the spatial position and orientation parameters which causes very high costs. The task of this study therefore is to plan, develop and finally evaluate a system which is able to acquire outdoor objects using a high resolution profile-measuring terrestrial laser scanner under abdication of inertial sensors.

The use of a profile-measuring scanner on a moved platform leads to a helix-wise acquisition of the environment. In order to avoid distortions within the point cloud by driving along curves, position and orientation parameters must be determined for each scan pixel. In the context of this work a measuring computer with a realtime operating system was used to synchronize the profile data registered by the scanner with the position measurements of a GPS-receiver and the inclination data of a liquid-based inclinometer. The thereby possible determination of the interdependencies between the scanner- and GPS-data allows the elimination of systematic effects within the point cloud, which result from the influence of the vehicle movement.

The second characteristic of the developed concept which arises from the renouncement of an inertial measurement system consists in the indirect derivation of the spatial orientation parameters by evaluating the speed vectors contained in the state vector. By using a kinematically formulated Kalman filter, these data can be predicted for each GPS-epoch same as for any moment the scanner data are acquired. The input values are kinematically processed single point positions of a differential GPS-evaluation using a virtual reference station (VRS) of the Satellite Positioning Service (SAPOS) of the German State Survey. Due to the increased measurement noise of GPS-observations with short observation times, the filtered trajectory was smoothed additionally by a Rauch-Tung-Striebel algorithm in order to ensure a homogeneous point cloud. A sufficiently smoothed trajectory is mandatory, since due to the extrapolation effect of the azimuth on distant regions of the point cloud even comparatively small deviations of the single points can lead to larger distortions in the object space.

In the context of an evaluation various measurements in addition to detailed calibration work were accomplished on three different test areas in order to be able to give evidence of the achievable accuracies of the prototype, its components and cost-effectiveness compared to static methods. Concerning accuracy issues it was stated that remaining systematic effects of the vehicle position determined by GPS-observations indeed have a significant influence on the accuracy of the derived yaw angles. Apart from these well-known influence values, also high frequency roll-motions of the prototype led to uncompensable systematic effects on the spatial orientation parameters.

Despite the deviations caused by these influence values the precision demands on the system could partly be exceeded clearly. The relative accuracies of two transformed and corrected point clouds obtained in opposite directions for example were better than 0.1 m. In addition the outer system accuracy which was determined by measurements with the precise SAPOS GPPS service showed a mean deviation significantly below 0.1 m.

This dissertation has shown that the development of a mobile-mapping-system for highly resolved object acquisition with mid-range accuracies using profile-measuring terrestrial laser scanners and geodetic standard sensors is possible even without the application of inertial sensors.

Keywords: Laser scanning, kinematic, terrestrial, real-time, object acqusition, mobile mapping, Imager, GPS, point cloud

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **9**
1.1 Aufgabe . . . 9
1.2 Problemstellung . . . 11

2 Mobile-Mapping-Systeme **14**
2.1 Charakteristik und Klassifizierung von Mobile-Mapping-Systemen . . . 14
2.2 Vorstellung ausgewählter Systeme . . . 16
2.2.1 MoSES, Universität der Bundeswehr München . . . 16
2.2.2 SwissTrolley, ETH Zürich . . . 16
2.2.3 VLMS, Tokio . . . 17
2.2.4 GeoVAN . . . 18
2.3 Zusammenfassung . . . 19

3 Bestimmung von Position und Orientierung **20**
3.1 Räumliche Koordinatensysteme . . . 20
3.1.1 Earth-Centered-Earth-Fixed-System . . . 20
3.1.2 Parametersysteme in der Abbildungsebene . . . 21
3.1.3 Lokales topozentrisches System . . . 21
3.1.4 Body-System . . . 21
3.2 Transformation der Messungen in ein Gebrauchskoordinatensystem . . . 22
3.2.1 Grundlegende Vorgehensweise . . . 22
3.2.2 Transformation der GPS-Positionen . . . 24
3.2.3 Verebnung der ellipsoidischen Koordinaten . . . 24
3.2.4 Auswirkung des Versatzes zwischen Antenne und Fahrzeugnullpunkt . . . 25
3.2.5 Transformation der Scanpunkte . . . 27
3.3 Bewegungsmodelle . . . 28
3.4 Filteralgorithmen . . . 29
3.4.1 Kalman-Filter . . . 29
3.4.2 Statistische Bewertung der Innovation . . . 33
3.4.3 Erweiterung des Zustandsvektors . . . 34
3.5 Glättungsalgorithmen . . . 35
3.5.1 Klassifizierung der Algorithmen . . . 35
3.5.2 Vorwärts-Rückwärts-Kalman-Filter . . . 35
3.5.3 Rauch-Tung-Striebel-Algorithmus . . . 36
3.6 Positionsbestimmung mit GPS . . . 36
3.6.1 Anforderungen an die Positionsbestimmung . . . 36
3.6.2 DGPS und SAPOS . . . 37
3.6.3 Vernetzung und virtuelle Referenzstationen . . . 38
3.6.4 Interpolation von GPS-Beobachtungen . . . 39
3.7 GPS-gestützte Bestimmung von Gier-, Nick- und Rollwinkel . . . 40
3.7.1 Vor- und Nachteile der Nutzung von GPS . . . 40
3.7.2 Differentielle GPS-Phasenmessungen . . . 40
3.7.3 Das Kalman-Filter . . . 41
3.7.4 Relatives DGPS . . . 42

4 Terrestrische Laserscanner **44**
4.1 Grundlagen terrestrischer Laserscanner . . . 44
4.2 Verfahren zur Distanzmessung . . . 45
4.2.1 Phasenvergleichsverfahren . . . 45
4.2.2 Impulslaufzeitverfahren . . . 46
4.3 Gesichtsfeld . . . 46
4.4 Strahlablenkung . . . 47
4.5 Profilmessende Scanner . . . 48

4.5.1 Vorauswahl . . . 48
4.5.2 Zoller+Fröhlich Imager 5003 . . . 48
4.5.3 Zoller+Fröhlich Imager 5006 . . . 50
4.5.4 Riegl LMS-Z390 . . . 51
4.5.5 Sick Profilscanner . . . 51
4.5.6 Zusammenfassung . . . 52

5 Echtzeitfähige Messsysteme 54
5.1 Anforderungen an die Messhardware . . . 54
5.2 Echtzeitbetriebssysteme . . . 55
5.2.1 Begriffliche Einordnung der Echtzeit . . . 55
5.2.2 Abgrenzung zu konventionellen Betriebssystemen . . . 55
5.2.3 Rechtzeitigkeit . . . 57
5.2.4 Gleichzeitigkeit . . . 58
5.2.5 Verfügbarkeit . . . 59
5.2.6 Determiniertheit . . . 59
5.2.7 Taskverwaltung . . . 59
5.2.8 Taskumschaltung/Scheduling . . . 60
5.2.9 Tasksynchronisation . . . 63
5.2.10 Inter-Task-Kommunikation . . . 64
5.3 Ausgewählte Systeme . . . 64
5.3.1 Weitere Hersteller . . . 64
5.3.2 National Instruments . . . 65
5.3.3 Sorcus GmbH . . . 69
5.3.4 Zwischenfazit . . . 71

6 Das Messsystem 72
6.1 Anforderungen an Sensorik und Messhardware . . . 72
6.2 Begründung der Sensorauswahl . . . 76
6.2.1 GPS . . . 76
6.2.2 Inklinometer . . . 78
6.2.3 Thermometer . . . 82
6.2.4 Laserscanner . . . 83
6.3 Das Echtzeitmesssystem . . . 85
6.3.1 Sensorkonfiguration und Datenformate . . . 85
6.3.2 MAX5dip . . . 86
6.3.3 Erfassung digitaler Signale . . . 87
6.3.4 Erfassung analoger Signale . . . 89
6.3.5 Serielle Datenerfassung . . . 91

7 Prüfung und Kalibrierung der Komponenten 92
7.1 Ansätze zur Kalibrierung . . . 92
7.1.1 Begriffliche Einordnung . . . 92
7.1.2 System- und Komponentenkalibrierung . . . 93
7.2 Ermittlung des Kalibrierumfangs . . . 96
7.2.1 Vereinfachende Annahmen . . . 96
7.2.2 Ansätze zur Kalibrierung von Laserscannern . . . 97
7.3 Kalibrierung des Laserscanners . . . 101
7.3.1 Indexabweichung des Vertikalencoders . . . 101
7.3.2 Achsabweichungen . . . 102
7.3.3 Temperaturabhängigkeit . . . 103
7.4 Kalibrierung des Inklinometers . . . 104
7.4.1 Nullpunkt und Maßstab . . . 104
7.4.2 Temperatureinfluss und Signalrauschen . . . 106

7.5 Fahrzeug- und Sensorkoordinatensysteme . . . 107
7.5.1 Einrichtung des Fahrzeugkoordinatensystems . . . 107
7.5.2 In-situ-Orientierung des Scanners . . . 108
7.6 Prüfung und Kalibrierung des Echtzeitrechners . . . 109
7.6.1 Drift der Uhr . . . 109
7.6.2 Latenzzeiten . . . 109
7.7 Fazit der Kalibrierarbeiten . . . 111

8 Messung und Auswertung der Daten 113
8.1 Übersicht über den Mess- und Auswertevorgang . . . 113
8.2 Steuerung des Messablaufs . . . 114
8.3 Datenerfassung auf der MAX5dip . . . 116
8.3.1 Anforderungen an die Software . . . 116
8.3.2 Struktur und Installation von Echtzeitprogrammen . . . 117
8.3.3 Timer- und ereignisgesteuerte Programmierung . . . 118
8.3.4 Zugriff auf die Messhardware . . . 119
8.3.5 Funktionsweise einer Echtzeit-Task . . . 120
8.3.6 Ansätze zur Optimierung der Systemleistung . . . 121
8.4 Auswertesoftware (RAMSYS PCloud) . . . 121
8.4.1 Workflow . . . 121
8.4.2 Vorauswertung der Daten . . . 122
8.4.3 Erzeugung der Datenobjekte . . . 123
8.4.4 Bestimmung der Startwerte für die Filterung . . . 124
8.4.5 Filterung der Daten und Ableitung der Azimute . . . 125
8.4.6 Erzeugung der Punktwolke . . . 126

9 Validierung des Systems 127
9.1 Rahmen und Umfang der Validierung . . . 127
9.2 Qualität der Sensordaten . . . 127
9.2.1 Standardabweichung der GPS-Positionen . . . 127
9.2.2 Referenzierung der Scanprofile . . . 129
9.2.3 Einfluss der Querbeschleunigung auf Inklinometermessungen . . . 130
9.3 Verfahren zur Filterung und Glättung der Trajektorie . . . 131
9.3.1 Stärken und Schwächen der Filter- und Glättungsalgorithmen . . . 131
9.3.2 Einfluss des GPS-Empfangs . . . 131
9.3.3 Einfluss von Fahrzeugbewegungen . . . 133
9.3.4 Vergleich der Glättungsverfahren . . . 134
9.4 Verfahren zur Azimutbestimmung . . . 136
9.4.1 Vergleich von Inertialmesssystem und Ableitung aus Kalman-Filter . . . 136
9.4.2 Innere Genauigkeit der relativen DGPS-Lösung . . . 140
9.5 Genauigkeit des Systems im Objektraum . . . 142
9.5.1 Diskretisierung von Vergleichsgrößen . . . 142
9.5.2 Innere Messgenauigkeit des Systems . . . 142
9.5.3 Äußere Messgenauigkeit des Systems . . . 148

10 Vergleichende Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit des Systems 150
10.1 Definition von Beispielprojekten . . . 150
10.2 Welfenschloss mit Vorplatz . . . 150
10.3 Fassade des Welfenschlosses . . . 152
10.4 Nienburger Straße . . . 153
10.5 Steigerung der Effektivität durch Echtzeiterfassung . . . 155

11 Zusammenfassung und Ausblick 157

12 Literaturverzeichnis 161

13 Abkürzungsverzeichnis **168**

A Technische Daten Laserscanner **169**

B Echtzeitbetriebssysteme in der Übersicht **170**

„Prediction is difficult - especially about the future.“
Niels Henrik David Bohr (1885-1962)

1 Einleitung

1.1 Aufgabe

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Konzeption, Entwicklung und Erprobung des schnellen und hochauflösenden Messsystems RAMSYS (RApid-Mapping-SYStem) zur vollständigen dreidimensionalen Erfassung künstlicher und natürlicher Objekte im Außenbereich. Diese auch als „Mobile-Mapping“ bezeichnete Aufgabenstellung bildet die Grundlage vieler Anwendungen aus den Bereichen Bestandserfassung, Planung und Visualisierung.
Die wesentliche Datengrundlage von Anwendungen dieser Art sind häufig innerstädtische Straßenräume, verschiedene bauliche Anlagen in ihrem Umfeld sowie spezielle Bauwerke und Landmarken im Außenbereich. Darüber hinaus können auch weiträumig ausgedehnte Objekte wie Industrieanlagen Schwerpunkt einer solchen Erfassungsaufgabe sein.
Als Nutzer dieser Daten und somit auch als Anwender des entwickelten Systems kommen sowohl öffentliche als auch privatwirtschaftliche Institutionen in Frage. Dreidimensionale Bestandsdaten werden mittlerweile verstärkt von öffentlichen Verwaltungen, kommunalen und privaten Planungsträgern sowie von Straßenmeistereien und Straßenbauämtern nachgefragt. Auch im Bereich der Unfallstellendokumentation ist die schnelle und berührungslose Erfassung von räumlich begrenzten Szenarien im Außenbereich für Polizei, Gerichte und Sachverständige von großer Bedeutung (Otte, 2005). Darüber hinaus sind Tourismusverbände, Anbieter von Daten für Geoinformationssysteme (GIS) sowie Bauträger und Projektentwicklungsgesellschaften potentielle Abnehmer der von einem solchen System erfassten Umgebungsinformationen.
Die bisher für „Mobile-Mapping“-Aufgaben konzipierten Systeme besitzen eine Reihe sensorischer und auswertemethodischer Nachteile, die einem wirtschaftlichen Einsatz und somit der verbreiteten Anwendung entgegenstehen. Für die Bestimmung der Fahrzeugtrajektorie kommt in fast allen Systemen eine Inertialmesseinheit zum Einsatz. Dies hat zwar den Vorteil, dass die Trajektorie mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann, ist auf der anderen Seite jedoch mit sehr hohen Investitionskosten verbunden. Darüber hinaus sind für die oben genannten Anwendungsgebiete nicht in jedem Fall Genauigkeiten im einstelligen Zentimeterbereich gefordert. Für die Erfassung der Objektpunktinformationen kommen bei den am Markt verfügbaren Systemen größtenteils photo- beziehungsweise videogrammetrische Stereobildsysteme zum Einsatz. Die Verwendung dieser Sensoren führt zu geringen Sensorkosten und bietet den Vorteil, dass die Stereobilder mit sehr hoher Frequenz erfasst werden können. Nachteilig wirkt sich hierbei jedoch aus, dass Objektpunkte nur bestimmt werden können, wenn diese in beiden Stereobildern erkennbar sind. Eine automatisierte Ableitung hochaufgelöster Objektinformationen ist bei den in Kapitel 2.2 vorgestellten aktuell existierenden Ansätzen noch nicht möglich. Wie bei allen passiven Sensoren ist die ausreichende Beleuchtung der gesamten Szene grundlegende Voraussetzung für einen Einsatz. Insbesondere die hohen Systemkosten, der manuelle Auswerteaufwand sowie die beschränkten Einsatzbedingungen machen die Neuentwicklung eines Messsystems zur Kompensation dieser Nachteile notwendig.
Obwohl Laserscanningverfahren bereits seit Ende der achtziger Jahre zur luftgestützten Erfassung der Erdoberfläche zum Einsatz kommen, wurde die Palette der terrestrischen geodätischen Sensoren zur Objektaufnahme erst durch Einführung von terrestrischen Laserscannern wie dem Cyrax 1000 (Wilson u. a., 1999) im Jahre 1997 entscheidend erweitert. Hierdurch war es möglich, Objekte mit Hilfe eines engmaschigen Punktrasters auch bei schlechten Lichtverhältnissen durch aktive Distanzmessung mit vergleichsweise hoher Genauigkeit zu erfassen. Im Unterschied zu photogrammetrischen Systemen bieten terrestrische Laserscanner die Möglichkeit der direkten dreidimensionalen Punktbestimmung mit Datenraten von bis zu 500.000 Punkten pro Sekunde.
Ungeachtet der genannten Vorteile werden diese Instrumente bisher überwiegend für statische Aufnahmen, das heißt von festen Standpunkten aus, eingesetzt. Aufgrund der hohen Messfrequenz erscheint es sinnvoll, terrestrische Laserscanner als Ergänzung zu statischen Scans auch auf bewegten Plattformen einzusetzen (Abbildung 1.1). Genau dieser Ansatz der kinematischen Umgebungserfassung von einer bewegten Plattform mit einem profilmessenden Laserscanner soll in der vorliegenden Arbeit verfolgt werden.

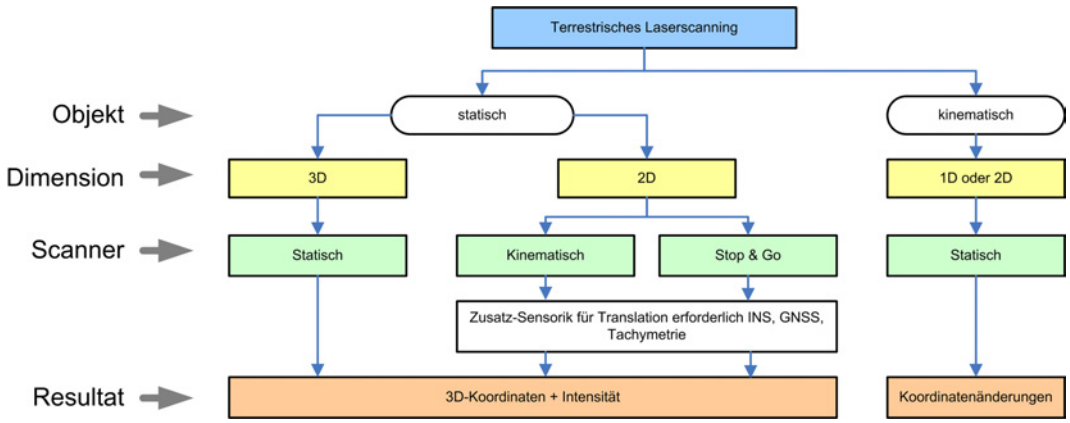


Abbildung 1.1: Einsatzmöglichkeiten terrestrischer Laserscanner
(Staiger und Wunderlich, 2007)

Die Aufgabe zur Entwicklung eines Mobile-Mapping-Systems gestaltet sich somit wie folgt: Als zentraler Sensor soll in diesem System ein hochauflösender terrestrischer Laserscanner zum Einsatz kommen. Dieser Scanner muss in der Lage sein, hochfrequente Profilmessungen bei Objektpunktgenauigkeiten von wenigen Millimetern durchzuführen. Die Georeferenzierung aller Scandaten ist unter Verzicht auf eine Inertialmesseinheit ausschließlich mit Hilfe satellitengestützer Verfahren und zusätzlicher Sensoren umzusetzen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist bei der Konzeption des Systems so weit wie möglich auf Standardkomponenten zurückzugreifen. Eine Vorstellung des dieser Arbeit zugrunde liegenden Konzeptes kann darüber hinaus Hesse (2006) sowie Hesse und Neumann (2007) entnommen werden.
Der vorgestellte Ansatz fügt sich in zwei zentralen Bereichen in den übergeordneten Kontext der aktuellen wissenschaftlichen Forschung ein. Eines der weiterführenden Ziele, das sich aus dieser Arbeit ergeben soll, ist die vollständige Automatisierung der kinematischen Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Bisher müssen im Rahmen einer Objektaufnahme mit Laserscannern mehrere Passpunkte manuell am oder in der Nähe des Objektes installiert werden. Während der eigentliche Scan automatisiert abläuft, ist die später durchzuführende Verknüpfung und Referenzierung einzelner Scans vor der Segmentierung und Modellierung ebenfalls manuell vorzunehmen (Abbildung 1.2). Durch den Einsatz des in dieser Arbeit entwickelten Prototyps ist es weder notwendig, Passpunkte zu installieren, noch die erfassten Einzelscans zu verknüpfen und zu georeferenzieren. Hierdurch erwächst die Möglichkeit einer vollständigen Automatisierung des örtlichen Erfassungs- und Bearbeitungsaufwandes. Denn nur durch größtmögliche Automatisierung können Effizienz und Wirtschaftlichkeit der scannergestützten Objektaufnahme signifikant gesteigert werden. In diesem Zusammenhang sei auch auf algorithmische Entwicklungen zur automatisierten Verknüpfung einzelner Punktwolken hingewiesen, wie sie zum Beispiel von Akca (2007) für das sogenannte „Surface-Template-Matching“ mit Hilfe von Flächennormalen unter Zuhilfenahme von Referenzflächen beschrieben werden.

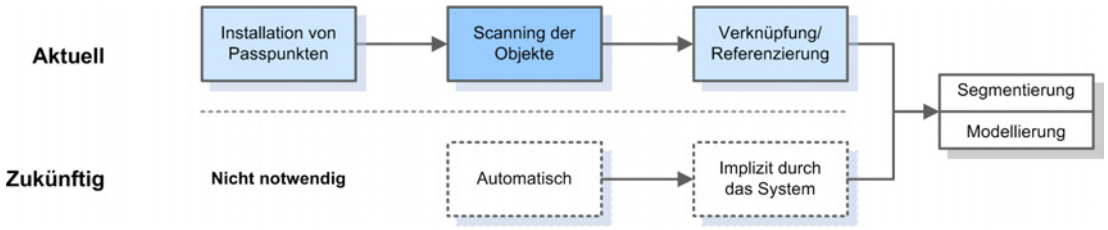


Abbildung 1.2: Aktueller und zukünftiger Ablauf eines Scanprozesses
(Hesse und Neumann, 2007)

Ein zweiter Bereich ist die Integration heterogener Sensorik, zu der auch verstärkt Laserscanner gehören werden, in einem gemeinsamen Messsystem. Diese häufig mit dem Begriff „Sensornetzwerke“ bezeichnete Verknüpfung verschiedenster Einzelsensoren in einem einheitlichen Konzept erfordert unter anderem die präzise Synchronisation aller Sensoren. Je nach Anforderungen an die Genauigkeit der Messergebnisse und die Zuverlässigkeit des Systems können, wie in der vorliegenden Arbeit, echtzeitfähige Messrechner als integraler Bestandteil der Synchronisierungsaufgabe genutzt werden.

1.2 Problemstellung

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Anforderungen an das System führen zu verschiedenen Problemstellungen, die in der vorliegenden Arbeit zu diskutieren und zu lösen sind. Sie basieren auf der Notwendigkeit, die während der Bewegung erfassten zweidimensionalen Scanprofile verzerrungsfrei in eine dreidimensionale Punktwolke zu überführen.
Grundsätzlich besteht jeder dreidimensionale Laserscan implizit aus einer Reihe zweidimensionaler Profilscans. Zur Überführung der zweidimensionalen Profile in den dreidimensionalen Objektraum wird lediglich der aktuelle Drehwinkel um die Stehachse des Scanners benötigt. Dieser wird während einer Messung über einen internen Winkelencoder ermittelt.

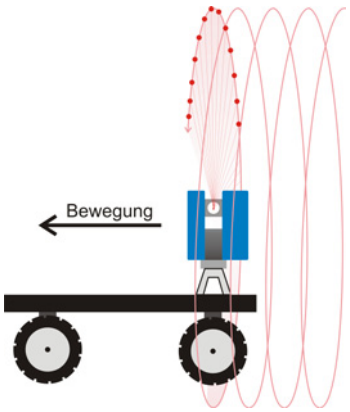


Abbildung 1.3: Helixförmige Objekterfassung

Im kinematischen Modus hingegen ist der horizontale Drehwinkel des Scanners über die gesamte Messdauer quer zur Fahrtrichtung fixiert. Hierdurch liegen die gescannten zweidimensionalen Objektpunkte $P_{i,2D}$ bei bewegtem Fahrzeug in Form einer langgezogenen Helix vor, die sich entlang der abgefahrenen Trajektorie erstreckt (Abbildung 1.3). Aufgrund der Fahrzeugbewegung sind sowohl die Scannerposition als auch seine Orientierung bezogen auf ein übergeordnetes Koordinatensystem unbekannt und unterliegen darüber hinaus während der Fahrt einer permanenten zeitlichen Änderung.
Eine Transformation der gescannten 2D-Objektpunkte in das übergeordnete System der Punktwolke gelingt in diesem Fall über eine zeitliche Referenzierung zwischen Punkterfassung und den entsprechenden Orientierungsparametern des Scanners. Hierzu ist der Erfassungszeitpunkt für den Zenitwinkel ζ_i und die Raumstrecke $S_{R,i}$ des i-ten Scanpunktes

$$\boldsymbol{t}(P_i)^{T_1} = \begin{bmatrix} t(\zeta_i) \\ t(S_{R,i}) \end{bmatrix}^{T_1} \tag{1.1}$$

zu bestimmen, der auf eine Zeitskala T_1 bezogen ist. Wenn auch die Position $\boldsymbol{X}_{Scanner}$ und die räumliche Orientierung $\boldsymbol{R}_{Scanner}$ des Scanners als zeitabhängiger Zustandsvektor $\boldsymbol{y}(t)$ mit

$$\boldsymbol{y}(t)^{T_2} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{Scanner}(t) \\ \boldsymbol{R}_{Scanner}(t) \end{bmatrix}^{T_2} \tag{1.2}$$

bekannt sind, können die zweidimensionalen Profildaten grundsätzlich in eine dreidimensionale Punktwolke transformiert werden. Die Schwierigkeit bei der Umsetzung dieses Lösungsansatzes besteht darin, dass die Scanpunkte P_i auf eine Zeitskala $T_1 \neq T_2$ bezogen sind, deren Versatz zu T_2 zunächst unbekannt ist.
Für eine Umrechnung der 2D-Profilmessungen in eine 3D-Punktwolke sind somit drei zentrale Probleme zu lösen:

1. Bestimmung der vom Scanner zurückgelegten Trajektorie
2. Bestimmung der räumlichen Orientierung des Fahrzeuges/Scanners
3. Zeitliche Referenzierung von Fahrzeugposition und Scannerdaten

Die Bestimmung der Fahrzeugtrajektorie kann, wie bei herkömmlichen Mobile-Mapping-Systemen auch, mit Hilfe satellitengeodätischer Verfahren oder zielverfolgender Tachymeter erfolgen. Nicht nur für die Transformation der Antennenposition auf den Koordinatenursprung des Scannersystems, sondern insbesondere für die spätere Ausrichtung der Scanprofile im Raum werden die Orientierungsparameter des Fahrzeuges sowie die Orientierung des Scannersystems zum Fahrzeug benötigt.
An diesem Punkt wirkt sich das Fehlen einer Inertialmesseinheit direkt aus, da die unbekannten räumlichen Orientierungsparameter in Gleichung (1.2) nunmehr auf anderem Wege zu bestimmen sind. Sie können zum einen durch eine Erweiterung des Messsystems um zusätzliche GPS- sowie GLONASS-Empfänger und zum anderen auf algorithmischem Wege durch Ableitung aus dem Zustandsvektor einer Kalman-Filterung bestimmt werden. Durch den Kalman-Filter-Ansatz können jedoch nur zwei der drei unbekannten Raumwinkel ermittelt werden, so dass zur Bestimmung des Drehwinkels um die Längsachse ein zusätzlicher Neigungssensor benötigt wird.
Auch für die Lösung der dritten Problemstellung sind hardwarebasierte und methodische Ansätze denkbar. Die gegenseitige Referenzierung von GPS-gestützter Positionsinformation und gescannten Objektpunkten, die als Synchronisierung bezeichnet werden kann, hat zum Ziel, den Zeitversatz zwischen T_2 und T_1

$$\Delta t_{TLS,GPS} = T_1 - T_2 \tag{1.3}$$

zu bestimmen. Martin und Vennegeerts (2008) schlagen hierzu vor, mehrere Zielmarken am Anfang einer Trajektorie auszulegen und ihre Position durch GPS-Messungen zu bestimmen. Diese werden zudem vor Beginn der Messung dreidimensional durch den Laserscanner erfasst. Durch die bekannte Position der Zielmarken kann der Zeitversatz dann bestimmt werden, wenn diese Marken auch im kinematischen Scan enthalten sind.
Wenn Installationen im Objektraum nicht möglich sind, kann die Erfassung der Signalzeitpunkte aller gemessenen Daten auch mit Hilfe eines echtzeitfähigen Messrechners vorgenommen werden. Da Laserscannerdaten in der Regel mit Latenzzeiten von mehreren Sekunden an einen Auswerterechner übertragen werden, kann diese Vorgehensweise nur zum Erfolg führen, wenn der wirkliche Zeitpunkt der Messung determinierbar ist.
Die notwendige Genauigkeit einer Synchronisierung der verschiedenen Signale ist direkt abhängig von der Fahrtgeschwindigkeit der Plattform und der Form der Trajektorie. So wirkt sich ein vorhandener Zeitversatz bei Kurvenfahrten aufgrund der erhöhten Tangentialgeschwindigkeit stärker aus als bei einer geradlinigen Bewegung.

Parameter	**Rahmenbedingung**
Genauigkeit der Punktbestimmung	
Ebene (absolut/relativ)[1]	$<$ 20 cm / 10 cm
Höhe (absolut/relativ)[1]	$<$ 20 cm / 10 cm
Auflösung in Längsrichtung	$<$ 20 cm (abhängig von Profilfrequenz)
Erfassungskorridor	
Länge	$<$ 500 m
Breite	$<$ 20 m
Geschwindigkeit	$<$ 50 km/h
GPS Empfang	$>$ 4 Satelliten
Strecke	Straßenraum
	Fahrbahnoberfläche ohne Unstetigkeiten
Sensoren/Hardware	Geodätische Standardsensoren
	Echtzeitfähiger Messrechner
Weitere Anforderungen	Vollständiger Verzicht auf Sensorik außerhalb des Messfahrzeuges (abgesehen von GPS-Satelliten)

[1] Standardabweichung

Tabelle 1.1: Übersicht über die Anforderung an das MMS

Tabelle 1.1 definiert eine Reihe von Anforderungen an das zu entwickelnde System, die sich sowohl aus dem Einsatzzweck als auch aus verschiedenen messtechnischen Rahmenbedingungen ergeben. So soll das

System in erster Linie der Erfassung von Straßenräumen und deren näherem Umfeld dienen, die in aller Regel eine große Länge bei einer vergleichsweise geringen Breite von bis zu 20 m aufweisen. Obwohl bei einem Einsatz im Wettbewerbsumfeld auch langgestreckte Aufnahmen von mehreren Kilometern Länge durchzuführen sind, soll der Erfassungsumfang aus Gründen der Datenmenge und der durchzuführenden Evaluierung des Systems auf 500 m begrenzt werden.
Die angegebenen Genauigkeiten der Einzelpunktbestimmung orientieren sich zum einen an der Einordnung des Systems in einen Bereich, der von der Mehrzahl der vorhandenen Mapping-Systeme entweder aufgrund mangelnder Rentabilität nicht angestrebt oder sensorbedingt nicht erreicht wird. Zum anderen ergeben sich die genannten absoluten Standardabweichungen für das vorliegende System aufgrund der starken Abhängigkeit der zu bestimmenden Positions- und Orientierungsparameter von satellitengestützten Messverfahren. Sie beschreiben in diesem Fall die mit aktueller Sensorik erzielbare Genauigkeit der Systemkomponente. Ausgehend von umfangreichen Voruntersuchungen wurde für die absolute Punktgenauigkeit ein Rahmen von besser als 0.2 m sowohl für die Lage- als auch die Höhenkomponente definiert. Bezogen auf die relative Einzelpunktgenauigkeit innerhalb der Punktwolke, die für verschiedene Anwendungsgebiete eine höhere Priorität als absolute Genauigkeitsmaße besitzt, wurde der Grenzwert mit jeweils 0.1 m für die Lage- und Höhenwerte festgelegt. Der Relativbezug der angegebenen Genauigkeitsanforderungen richtet sich ebenso wie die angestrebte Auflösung in Längsrichtung nach dem zu erfassenden Objekt sowie dem Anwendungszweck und ist somit nur schwer zu konkretisieren. Im Hinblick auf die geplanten Evaluierungsmessungen ist die angegebene Relativgenauigkeit des Systems auf eine Ausdehnung von bis zu 10 m bezogen.

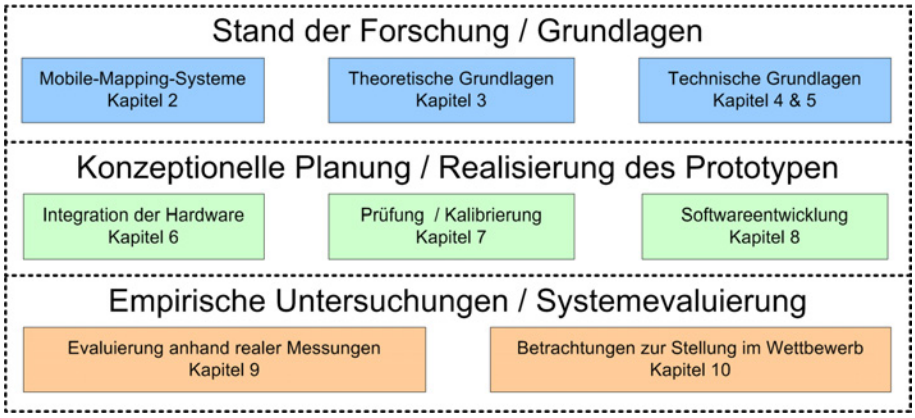


Abbildung 1.4: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und empirischen Erprobung eines Mobile-Mapping-Systems, das zur Umgebungserfassung unter den in Tabelle 1.1 definierten Bedingungen geeignet ist. Aus diesem Grund besteht sie sowohl aus einem konzeptionellen Teil, der zur Erarbeitung der theoretischen Grundlagen dient als auch aus der konkreten Auswahl geeigneter Sensoren und Algorithmen sowie der Realisierung eines einsatzfähigen Prototypen.
Wie aus Abbildung 1.4 entnommen werden kann, gliedert sich der Ablauf der Arbeit in drei wesentliche Abschnitte, welche die bereits angesprochene Trennung von Theorie und Empirie widerspiegeln. Im Rahmen des ersten Teils werden bestehende Mobile-Mapping-Systeme betrachtet und bewertet sowie die theoretischen und technischen Grundlagen der kinematischen Umgebungserfassung erarbeitet.
Der zweite Abschnitt, beginnend mit Kapitel sechs, vollzieht den Übergang hin zur konkreten ingenieurtechnischen Umsetzung und befasst sich, aufbauend auf den Erkenntnissen des ersten Teils, mit der konzeptionellen Planung des Systementwurfs. Obwohl in diesem Abschnitt verstärkt Bezug auf das zu entwickelnde System genommen wird, können die diskutierten Themenbereiche auch auf allgemeine geodätische Fragestellungen wie die Kalibrierung von Sensoren übertragen werden. Dieser Abschnitt schließt nach der erfolgten Realisierung eines praxistauglichen Prototypen mit der Entwicklung der notwendigen Mess- und Auswertesoftware.
Im abschließenden dritten Teil werden eine Evaluierung des Systems anhand realer Datensätze sowie eine Beurteilung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit des Systems im Wettbewerbsumfeld vorgenommen. Im diesem Abschnitt sind neben einer Effizienzbetrachtung auch der Ausblick auf notwendige Modifikationen hinsichtlich eines Einsatzes des entwickelten Messsystems im Echtzeitumfeld zu finden.

2 Mobile-Mapping-Systeme

2.1 Charakteristik und Klassifizierung von Mobile-Mapping-Systemen

Mobile Systeme zur zwei- oder dreidimensionalen Umgebungserfassung werden allgemein unter dem Begriff „Mobile-Mapping-Systeme“ (MMS) zusammengefasst. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass verschiedene Sensoren auf einer gemeinsamen mobilen Plattform - in der Regel einem Kraftfahrzeug - über oder entlang eines Objektes bewegt werden.

Die Auswertung der Daten geschieht im Unterschied zu deren Erfassung in der Regel im Postprocessing. Der Grund liegt zu einen im Volumen der erfassten Datenmenge und zum anderen in der Auswertemethodik begründet. So lassen sich bei einer Auswertung von Beobachtungen globaler satellitengestützter Navigationssysteme, die auch als GNSS („Global Navigation Satellite Systems“) bezeichnet werden, im Postprocessing deutlich höhere Genauigkeiten erzielen als im Echtzeitbetrieb. Aufgrund der Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten ist eine vollständige Darstellung des Mess- und Auswerteganges nicht möglich. Nach El-Sheimy (2005) lassen sich jedoch folgende grundlegende Prozessierungsschritte für ein Mobile-Mapping-System anführen:

- Datenerfassung durch Sensoren/Messmodule
- Kinematische Modellierung der Trajektorie
- Synchronisation der Daten
- Anbringung der Kalibrierparameter
- Georeferenzierung
- Sensorintegration und Datenfusion
- Qualitätskontrolle
- Optimierung des Datenflusses und Automatisierung

Im Hinblick auf die in Mobile-Mapping-Systemen verwendeten Sensoren ergibt sich schnell eine Einteilung in zwei Kategorien. Die Sensoren dienen zum einen zur Bestimmung von Positions- und Orientierungsparametern oder werden zur Erfassung der Umgebung eingesetzt. Tabelle 2.1 zeigt eine Auswahl von häufig in MMS anzutreffenden Sensoren.

Sensor	**Genauigkeit**[1]	**Dimension**	**Messgröße**
Position/Orientierung			
GNSS	N	3D	Kinematische Position
Differential GNSS	H	3D	Hochgenaue kinematische Position
GNSS-PPP[2]	M	3D	Genaue kinematische Einzelpunktposition
GNSS-Pseudolites	H	3D	Genaue kinematische Einzelpunktposition
GNSS-PPP	H,M,N	3D	Räumliche Orientierung und Beschleunigungen
Odometer	H	1D	Streckendifferenzen aus Radumdrehungen
Tachymeter	H	3D	Lokale dreidimensionale Position
Inertialsystem	H	3D	Relativposition und Raumwinkel
Elektron. Kompass	N	1D	Orientierung nach magnetisch Nord
Umgebungserfassung			
CCD[3]-/Videokamera	H,M	2D	Bildkoordinaten in Stereobildern
Range Imaging	M,N	3D	Räumliche Objektkoordinaten
Profilscanner	M,N	2D	Objektkoordinaten in Profilebene
TLS[4]	H,M	3D	Hoch aufgelöste räumliche Objektkoordinaten
Ultraschallsensor	M	1D	Entfernung zwischen Sensor und Objekt
Radar	M	3D	Räumliche Objektkoordinaten

[1]N: Niedrig, M: Mittel, H: Hoch; [2]GNSS-PPP: Auswertung von GNSS-Beobachtungen durch Precise Point Positioning
[3]CCD: Charge Coupled Device; [4]TLS: Terrestrische Laserscanner

Tabelle 2.1: Sensoren eines MMS und ihre Charakteristik

Die Möglichkeiten zur Positionsbestimmung sind sehr vielfältig und werden wesentlich durch die benutzerdefinierten Anforderungen an Genauigkeit, Redundanz und Investitionsvolumen bestimmt. Bei hohen und höchsten Anforderungen kommen differentielle GNSS-Lösungen zum Einsatz, die zur Überbrückung von Signalausfällen zusätzlich durch Inertialmesssysteme unterstützt werden. Bei Anwendungen mit streng begrenztem Aktionsradius werden gelegentlich auch tachymetrische Systeme zur Positionsbestimmung verwendet, die allerdings meist als zusätzliche Option angeboten werden. Durch eindimensionale Sensoren wie Odometer oder Korrelationsgeschwindigkeitssensoren kann die Genauigkeit der zurückgelegten Wegstrecke über kurze Zeiträume deutlich erhöht werden. Darüber hinaus wurden auch aufwendige Möglichkeiten zur Nutzung von GPS-Pseudolites bei starken Signalabschattungen in urbanen Umgebungen erprobt (Grejner-Brzezinska und Yi, 2002).
Die bildgebende Sensorik richtet sich in erster Linie nach den Anforderungen an die zu erfassenden Objekte. Für die Erfassung von Objekten im Nahbereich werden häufig digitale Videokameras im Stereobildverfahren eingesetzt. Darüber hinaus existieren Systeme, die Videosysteme zur Ermittlung der Position von Fahrbahnrandmarkierungen verwenden (Kirchner und Ameling, 2000), (Fardi u. a., 2003). Diese Informationen können sowohl zur Erhebung von Bestandsdaten als auch zur Verbesserung der Positionsbestimmung genutzt werden. Häufig werden in Ergänzung dazu profilmessende Laserscanner mit niedriger räumlicher Auflösung eingesetzt, die Konturinformationen quer zur Fahrtrichtung liefern.
Ein weiterer Punkt bei der Bewertung eines MMS ist die Wirtschaftlichkeit der Gesamtlösung. Sie richtet sich in der Regel an den geforderten Genauigkeiten und dem Umfang der Erfassungsaufgabe aus und kann durch den Umfang möglicher Redundanzen bei der Positionsbestimmung oder eine Spezialisierung des Systems beeinflusst werden. Die häufig einander entgegenstehenden Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und den damit verbundenen Investitionskosten auf der einen und die Genauigkeit sowie den Erfassungsumfang auf der anderen Seite sind für ein ausgewogenes System zu berücksichtigen (El-Sheimy, 2005).

Umgebungserfassung	**Literatur**
Videogrammetrisch	
MoSES	Heister und Gräfe (2004); Gräfe (2003);
KiSS	Hoch u. a. (1995); Heister u. a. (1995); (Bielawski, 2000); Sternberg u. a. (2001);
Visat	El-Sheimy und Schwarz (1993); Schwarz u. a. (1993);
GPSVan	Novak (1990); Toth und Grejner-Brzezinska (2001); Grejner-Brzezinska und Toth (2002); Grejner-Brzezinska und Yi (2002)
Profilscanner	
VLMS	Manandhar und Shibasaki (2001b); Manandhar und Shibasaki (2002)
SwissTrolley	Wildi und Glaus (2002); Glaus (2006)
TeleInfo	Tele-Info AG (2004)
SpaceTec	SpaceTec (2007)
Fraunhofer Institut	Wirth (2007)
Terrestrische Laserscanner	
Geomobil	Alamús u. a. (2004); Talaya u. a. (2004a); Talaya u. a. (2004b); Alamús u. a. (2005)
CityScanner	GeoData (2005); Wack u. a. (2003)

Tabelle 2.2: Mobile-Mapping-Systeme in der bibliographischen Übersicht

Eine Klassifizierung von Mobile-Mapping-Systemen kann aufgrund verschiedener Parameter erfolgen. Hierzu bieten sich sensorseitig die Art der Positionsbestimmung sowie die Möglichkeiten zur Umgebungserfassung an. Auch die erzielbare Genauigkeit der Objekterfassung ist hierzu grundsätzlich geeignet. Ausgehend von der Tatsache, dass die Verwendung eines terrestrischen Laserscanners im Profilmodus eine wesentliche Neuerung des vorliegenden Systems darstellt, erfolgt eine Gruppierung der vorhandenen Systeme anhand der Art der Umgebungserfassung in drei Gruppen: Videogrammetrische Systeme, Systeme mit Profilscannern und Systeme auf Basis terrestrischer Laserscanner (Tabelle 2.2).

Eine Übersicht über diese heterogene Systemlandschaft kann naturgemäß nie abschließend geleistet werden, weshalb die Diskussion zum Stand der Technik anhand ausgewählter Systeme erfolgen soll.

2.2 Vorstellung ausgewählter Systeme

2.2.1 MoSES, Universität der Bundeswehr München

Abbildung 2.1: MoSES
(Heister und Gräfe, 2004)

Das (**Mo**bile **S**traßen **E**rfassungs-**S**ystem) MoSES ging 2001 als Nachfolgesystem aus der Entwicklung von KiSS hervor und kann bezüglich der Genauigkeitsanforderungen als high-end-System bezeichnet werden. Es besitzt eine Erfassungsgeschwindigkeit von $v_E = 100\ km/h$ und wird zur Erstellung und Fortführung digitaler Bestandspläne in Straßenräumen eingesetzt.
Die Positionsbestimmung erfolgt bei diesem System durch differentielle GNSS-Positionierung über SaPOS oder eigene Referenzstationen (Heister und Gräfe, 2004) sowie eine Applanix POS/LV 420 Inertialmesseinheit. Durch Verwendung dieser hochgenauen IMU können Drehungen um die horizontalen Fahrzeugachsen (siehe Abbildung 3.3), die mit Nick- und Rollwinkel bezeichnet werden, mit einer Standardaweichung von $\sigma_{Nick} = \sigma_{Roll} = 0.005°$, der Gierwinkel mit $\sigma_{Gier} = 0.02°$ bestimmt werden. Zusätzlich verfügt das System über ein digitales Barometer sowie ein Odometer zur Wegmessung.
Die Erfassung der digitalen Objektinformationen erfolgt bei diesem System mit Hilfe von drei unterschiedlichen Sensorsystemen. Die übergeordnete Erfassung semantischer Informationen erfolgt durch zwei digitale Videokameras, die genauen Objektpunktkoordinaten werden mit mindestens zwei CCD-Kameras in einer Stereobildauswerung ermittelt. Neben diesen beiden Systemen kommen profilmessende Laserscanner vom Typ Sick LMS 200 (Kapitel 4.5.5) zum Einsatz, die ein Gesichtsfeld von 180° bei einer Schrittweite zwischen 0.25° bis 1° besitzen und hinter dem Fahrzeug quer zur Fahrtrichtung ausgerichtet sind (Gräfe und Heister, 2004). Mit einer maximalen Profilrate von $f_P = 75Hz$ für 1° Schrittweite werden diese Scanner zur Erfassung von Querprofilen der Fahrbahn sowie der angrenzenden Fahrbahnrandbebauung eingesetzt.
Das System MoSES stellt, was die Sensorik zur Positions- und Orientierungsbestimmung anbelangt, eines der am höchsten entwickelten Mapping-Systeme dar. Die in empirischen Tests nachgewiesenen relativen Objektpunktgenauigkeiten von besser als 0.1 m sind als realistisch anzusehen und übertreffen die für diese Arbeit geforderten Genauigkeiten.
Der große Nachteil des Systems besteht in der Art der Datenerfassung und der nachfolgenden Auswertung. Durch die klare Fokussierung auf photo- beziehungsweise videogrammetrische Stereobilderfassung ist ein erheblicher Auswerteaufwand notwendig, um die gewünschten Objektinformationen zu erzeugen und aus dem Datenbestand zu extrahieren. Die verwendeten Profilscanner (Kapitel 4.5.5) sind allein aufgrund ihrer geringen Punktdichte ungeeignet, um die in Kapitel 1.1 definierten Anforderungen zu erfüllen. Darüber hinaus verhindern die geschätzten System- und Personalkosten für eine Messung und Auswertung einen wirtschaftlichen Einsatz in zahlreichen Anwendungsfeldern.

2.2.2 SwissTrolley, ETH Zürich

Das von Wildi und Glaus (2002) entwickelte System ist eine der aktuellen Entwicklungen auf Basis von Profilscannern im Bereich der Mobile-Mapping-Systeme. Es zielt von seiner Ausrichtung her in erster Linie auf die Erfassung von Gleisgeometrien mit einer Erfassungsgeschwindigkeit von 1 m/s, besitzt jedoch einige interessante Ansätze, die seinen Einsatz auch auf Straßenfahrzeugen möglich machen (Abbildung 2.2).
Zur Positionierung stehen beim SwissTrolley verschiedene Optionen zur Verfügung, standardmäßig erfolgt sie mit Hilfe einer RTK-GPS-Einheit. Beim Einsatz innerhalb von Tunnelbauwerken kann anstelle der satellitengestützten Lösung optional ein zielverfolgendes Tachymeter verwendet werden. Zur Unterstützung der Positionsbestimmung mit GPS kommen zwei Odometer zum Einsatz, die bei Kurvenfahrten auch als Differentialodometer benutzt werden können. Zusätzlich werden Nick- und Rollwinkel über zwei flüssigkeitsgedämpfte Inklinometer sowie die Umgebungstemperatur bestimmt (Glaus u. a., 2004).

Die für eine Modellierung der Fahrzeugbewegung notwendige Ermittlung des Gierwinkels erfolgt in diesem System nicht über originäre Messungen, sondern wird indirekt aus den Einzelpunktpositionen auf algorithmischem Wege abgeleitet. Hierbei wird jedoch die Eigenschaft gleisbasierter Systeme genutzt, bei denen Vorder- und Hinterräder des Messwagens - abgesehen von geringen Abweichungen - die gleiche Trajektorie zurücklegen. Das Bewegungsmodell wird in horizontale und vertikale Bewegung unterteilt, wobei die horizontale Trajektorie auf der bereits von anderen Systemen bekannten Annahme einer Kreisbewegung mit konstanter Geschwindigkeit aufsetzt.

Die Umgebungserfassung erfolgt in der optionalen Konfiguration durch zwei Laserscanner vom Typ Sick LMS-200. In einer gemeinsamen Steuereinheit wird das PPS-Signal eines angeschlossenen GPS-Empfängers zur Synchronisation mit den Scannerdaten genutzt. Die Anforderungen an die Synchronisiergenauigkeit der Sensordaten werden mit vergleichsweise geringen 1 ms angegeben (Glaus, 2006).

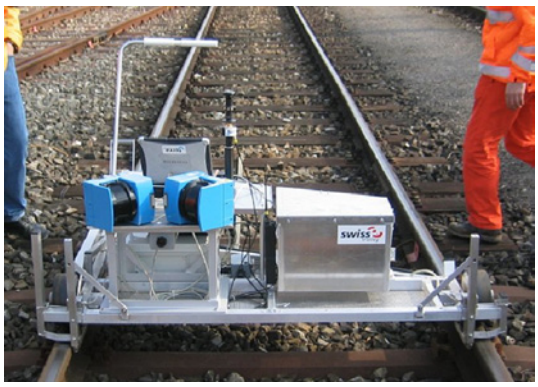


Abbildung 2.2: SwissTrolley (Glaus u. a., 2004)

Obwohl der SwissTrolley ursprünglich für Bahnanwendungen entwickelt wurde, finden sich in diesem System vergleichbare Ansätze zur vorliegenden Arbeit. So wird zum einen auf die Verwendung einer kostenintensiven Inertialmesseinheit verzichtet. Zum anderen wird die Umgebungserfassung durch einen aktiv messenden Sensor in Form eines Profilscanners vorgenommen, so dass einige der in der Problemstellung beschriebenen Defizite photogrammetrischer Systeme kompensiert werden.
Darüber hinaus wird auch eine einfache Referenzierung der vom Profilscanner zur Verfügung gestellten Daten realisiert, deren Genauigkeit jedoch für erhöhte Fahrtgeschwindigkeiten nicht ausreichend ist. Auch die in der vorliegenden Arbeit definierten Anforderungen an die Auflösung der Punktwolke im Objektraum können - genau wie bei MoSES - mit diesem Scannertyp keinesfalls erfüllt werden. Zudem kann der Modellansatz zur Bestimmung der abgefahrenen Trajektorie nicht ohne weiteres auf Straßenfahrzeuge übertragen werden.

2.2.3 VLMS, Tokio

Das „**V**ehicle **B**orne **L**aser **M**apping **S**ystem (VLMS) wurde am Centre for Spatial Science der Universität Tokio entwickelt und existiert mittlerweile in einer verbesserten zweiten Ausbaustufe. Es ist speziell für die Erfassung von georeferenzierten Straßen-, Umgebungs- und Gebäudeinformationen in städtischen Bereichen konzipiert und auf eine durchschnittliche Erfassungsgeschwindigkeit von 40 km/h ausgelegt (Manandhar und Shibasaki, 2002). Die hierbei verwendeten drei profilmessenden Laserscanner sind vertikal ausgerichtet und dienen im Unterschied zum MoSES-System als primäre Sensoren zur Datenerfassung. Die Profilebenen der Scanner sind zur Verringerung von Abschattungen gegeneinander gedreht angeordnet. Über insgesamt sechs CCD-Zeilensensoren mit 2048 Pixeln pro Zeile kann eine zusätzliche Texturerfassung der Umgebung erfolgen. Darüber hinaus wurde das System mit einer CCD-Videokamera ausgestattet, die eine Auflösung von 659 × 494 Pixel besitzt (Manandhar und Shibasaki, 2000). Die verwendeten Laserscanner besitzen ein Gesichtsfeld von 300° und arbeiten mit einer Profilfrequenz von $\gamma_P = 20\ Hz$ bei einer Schrittweite von 0.5° (Manandhar und Shibasaki, 2001a). Ob eine direkte Referenzierung der Scanzeilen durch Erfassung eines Triggersignals durchgeführt wird oder ob die Scanprofile anhand des Eintreffzeitpunktes der Daten einer Raumposition zugeordnet werden, ist nicht publiziert.

Abbildung 2.3: VLMS

Zur Bestimmung von Position und räumlicher Orientierung wird ein Inertialmesssystem mit GPS-Unterstützung und digitalem Odometer verwendet. Das Odometer liefert nicht nur Streckendifferenzen für die Positionsbestimmung, sondern sendet zudem einen Triggerpuls zur Auslösung der Bildmessung an die CCD-Zeilensensoren (Manandhar und Shibasaki, 2000).

Das VLMS-System verfolgt ebenso wie die vorliegende Arbeit den Ansatz, die Umgebungserfassung vornehmlich auf Basis profilmessender Laserscanner durchzuführen. Hierzu werden zwar drei Scanner mit adäquater Profilfrequenz verwendet, jedoch besitzen diese lediglich eine Auflösung von 600 Punkten pro Profil und liegen somit deutlich unterhalb der Objektauflösung von terrestrischen Laserscannern. Auch die Genauigkeit der verwendeten Profilscanner ist, wie die in Manandhar und Shibasaki (2001b) präsentierten Auswerteergebnisse zeigen, für die vorliegenden Anforderungen nicht ausreichend.

2.2.4 GeoVAN

Abbildung 2.4: GeoVAN
(Talaya u. a., 2004b)

Das am „Institut Cartografic de Catalunya“ in Barcelona entwickelte GeoVAN-System (ehemals Geomobìl) ist, wie auch MoSES, in die Kategorie der high-end Mapping Systeme einzuordnen. Die Besonderheit bei diesem System besteht darin, dass es als einziges bekanntes System einen terrestrischen Laserscanner der Firma Riegl zur kinematischen Umgebungserfassung im Profilmodus verwendet.

Position und räumliche Orientierung werden bei diesem System mit Hilfe einer Applanix POS/LV 420 ermittelt, die eine IMU, zwei GPS-Empfänger sowie ein Odometer beinhaltet. Auch hier können Nick- und Rollwinkel mit einer Genauigkeit von $\sigma_{Nick} = \sigma_{Roll} = 0.005°$, der Gierwinkel mit $\sigma_{Gier} = 0.02°$ bestimmt werden (siehe Abbildung 3.3). Die POS/LV 420-Einheit ist in der Lage, das Azimut des GeoVAN nicht nur über die Kreiselbeobachtungen der IMU, sondern zusätzlich auch über differentielle Phasenauswertungen der L1-Frequenz beider Antennen durchzuführen. Hierdurch können langfristige Drifteffekte der Kreisel kompensiert werden (Talaya u. a., 2004b).

Da der GeoVAN ursprünglich als photogrammetrisches Erfassungssystem konzipiert war, besitzt er für die Objekterfassung zwei digitale monochrome Kameras mit einer Auflösung von 1 Megapixel. In der ab 2003 vorgestellten Ausbaustufe wurde die Sensorik zur Bilderfassung um einen Riegl LMS-Z210 erweitert, der in der Lage ist, farbcodierte Messungen im Profilmodus durchzuführen (Talaya u. a., 2004a). Der Scanner kann hierzu sowohl horizontal als auch vertikal betrieben werden. Die Messungen können mit einer Profilfrequenz von f_P=20 Hz und einer Messentfernung von bis zu 80 m vorgenommen werden (Alamús u. a., 2005). Zur Synchronisierung der mit dem Laserscanner aufgenommenen Zeilenscans wird das PPS-Signal des GPS-Empfängers als direktes Triggersignal in den Datenstrom des Laserscanners integriert (Kapitel 4.5.4).

Die gesamte Sensorik mit Ausnahme der GPS-Antennen und des Laserscanners befindet sich in zwei klimatisierten Kammern auf dem Dach des Fahrzeuges, um temperaturbedingte systematische Effekte auszuschalten (Talaya u. a., 2004b). Aufgrund dieser Maßnahme sowie der umfangreichen Sensorik kann das Messsystem nicht über das Bordnetz des GeoVAN betrieben werden, sondern benötigt einen zusätzlichen Generator mit einer Leistung von 4000 W.

Im Rahmen empirischer Systemtests wurden verschiedene Aufnahmen des öffentlichen Straßenraumes mit Hilfe des GeoVAN durchgeführt. Die aus den Laserscannermessungen ermittelten Objektpunkte an Fassaden wurden mit digitalen GIS-Daten validiert. Der Abweichungsvektor $R = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Y^2}$ zu jeweils zehn als Referenz angenommenen Koordinaten wurde mit $R \leq 0.82\ m$ bestimmt, wobei die Standardabweichung der Referenzkoordinaten selbst mit $\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = 0.2$ m angegeben wurde . Die angegebenen Standardabweichungen der Koordinatendifferenzen liegen für die horizontalen Koordinatenrichtungen zwischen 0.18 m (Talaya u. a., 2004a) und 0.36 m Alamús u. a. (2004). Zur Genauigkeit der photogrammetrischen Objekterfassung siehe auch (Alamús u. a., 2005).

Hinsichtlich der Ausstattung des Systems stellt der GeoVAN sicherlich den aktuellen Stand der Technik dar, der jedoch auch mit erheblichen finanziellen Investitionen verbunden ist. Allein aus diesem Grund kommt die verwendete Systemkonfiguration für die vorliegende Arbeit nicht in Betracht, zumal die Erfassung mit dem Laserscanner auf ein Gesichtsfeld von 80° beschränkt ist. Auch die präsentierten Genauigkeiten für die Punktbestimmung im Objektraum sind unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten dieses Systems nicht zufriedenstellend.

2.3 Zusammenfassung

Die in Kapitel 1 definierten Anforderungen an das zu entwickelnde Messsystem bezüglich einer schnellen und wirtschaftlichen Erfassung von Objekten im Außenbereich mit einem hochauflösenden terrestrischen Laserscanner werden von keinem der vorgestellten Systeme erfüllt.
Sowohl **MoSES** als auch **GeoVAN** zeigen zwar Lösungen zur hochgenauen Positions- und Orientierungsbestimmung, können aber lediglich als modellhafte Forschungsvorhaben betrachtet werden. Ein wirtschaftlicher Einsatz in einem breiten Anwendersegment erscheint aufgrund des enormen technischen Aufwandes unrealistisch. **GeoVAN** besitzt als einziges System die Möglichkeit einer hochpräzisen Referenzierung der Scannerdaten, die jedoch herstellerseitig erfolgt und somit nicht auf Scanner von Wettbewerbern mit größerem Gesichtsfeld adaptierbar ist.
Das **VLMS**-System stützt die Datenerhebung ausschließlich auf profilmessende Laserscanner, die jedoch aufgrund der sehr geringen Auflösung nicht in der Lage sind, eine anspruchsvolle Umgebungserfassung vorzunehmen.
Als einziges System verzichtet der **SwissTrolley** auf eine Inertialmesseinheit und kommt hinsichtlich der Anforderungen an die Trajektorienbestimmung der vorliegenden Arbeit am nächsten. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Modellierung der Bewegung des Gleismesswagens auf den Schieneneinsatz ausgerichtet ist. Zudem kommt auch hier der gleiche Profilscanner zum Einsatz, der in **MoSES** verwendet wird.
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz eines terrestrischen Laserscanners mit hochgenauer zeitlicher Referenzierung der Scannerdaten zur kinematischen Erfassung langgestreckter Objekte im Außenbereich und ihrer Umgebung unter Verzicht auf eine IMU bislang nicht gelöst wurde.

3 Bestimmung von Position und Orientierung

3.1 Räumliche Koordinatensysteme

Zur Abbildung eines Punktes im dreidimensionalen Raum ist im Allgemeinen ein Koordinatentripel erforderlich, welches bei kinematischen Anwendungen auch zeitbezogen formuliert werden kann. Jedes Koordinatentripel benötigt zur eindeutigen Festlegung ein Koordinaten- oder Referenzsystem, welches wiederum durch seinen Ursprung und seine Ausrichtung definiert ist. Entsprechend der gängigen Nomenklatur wird in diesem Zusammenhang zwischen dem reinen Konzept, dem sogenannten „System“, und seiner konkreten Realisierung durch die Zuweisung von Werten zu den Parametern eines Koordinatensystems, dem „Rahmen“ (engl.: „Frame“), unterschieden (Hofmann-Wellenhof u. a., 2003).
Im Rahmen dieser Arbeit werden erdfeste, topozentrische und körperfeste Systeme beziehungsweise Frames verwendet, die häufig auch mit ihrer englischen Bezeichnung Earth-Centered-Earth-Fixed (ECEF), local-level und body-System bezeichnet werden. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über allgemein in Mobile-Mapping-Systemen und speziell im vorliegenden Projekt verwendete Systeme sowie deren Bezeichnungen.

System	Bezeichnung	Verwendung für
ECEF	$\boldsymbol{X}_E$, $\boldsymbol{X}_{WGS}$	GPS-Beobachtungen
Ellipsoidisch-isotherm	$\boldsymbol{X}_{GK}$	Gauß-Krüger-Zielsystem
Lokal-topozentrisch	$\boldsymbol{X}_T$	Zwischensystem
Body	$\boldsymbol{X}_B$	Sensoren, Fahrzeug
Fahrzeug	$\boldsymbol{X}_F$	Bewegte Plattform

Tabelle 3.1: Übersicht über die verwendeten Koordinatensysteme

3.1.1 Earth-Centered-Earth-Fixed-System

Ein Earth-Centered-Earth-Fixed-Koordinatensystem, das häufig auch als terrestrisches Äquatorialsystem (Hofmann-Wellenhof u. a., 2003) oder globales erdfestes geozentrisches System (Torge, 2003, Seite 29) bezeichnet wird, ist in Abbildung 3.1 zu sehen.

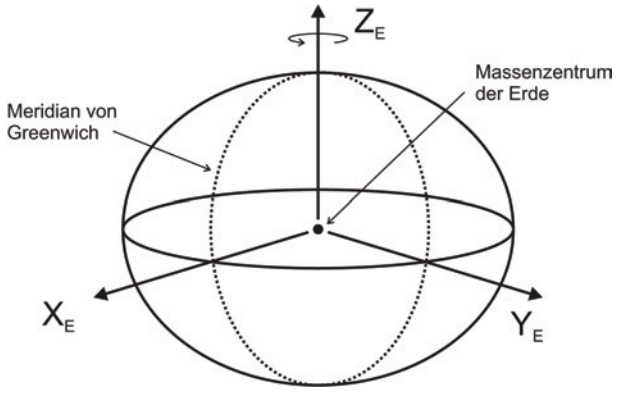


Abbildung 3.1: Earth-Centered-Earth-Fixed-System

Der Ursprung dieses Systems ist identisch mit dem idealisierten Massenschwerpunkt der Erde, seine Z_E-Achse entspricht der mittleren Rotationsachse der Erde zu einer definierten Epoche, ist also zum konventionellen mittleren Nordpol gerichtet. Die X_E-Achse schneidet den Meridianbogen von Greenwich und liegt ebenso wie die Y_E-Achse, die das rechtshändige System vervollständigt, in der Äquatorebene. Dieses dreidimensionale Koordinatensystem ist durch seine Ausrichtung fest mit der Erde verbunden und vollzieht somit eine Drehung um seine Z-Achse. Bedingt durch verschiedene geodynamische Vorgänge unterliegt dieses Koordinatensystem gewissen zeitlichen Änderungen, deren Gründe der Literatur entnommen werden können (Torge, 2003, Seite 34 f.).
Beispiele eines solchen ECEF-Systems sind das International Terrestrial Reference System (ITRS) sowie das dem GPS zugrunde liegende WGS84-System. Das WGS84 besitzt nach Hofmann-Wellenhof u. a. (2003) in seiner seit 1996 gültigen Fassung keine signifikanten systematischen Unterschiede mehr

zum ITRS. Da dem WGS84 ein Ellipsoid zugrunde liegt, erfolgt die Darstellung von Koordinaten nicht ausschließlich kartesisch, sondern häufig auch in ellipsoidischer Notation durch die Länge φ, die Breite λ und die ellipsoidische Höhe h. Für die ellipsoidische Darstellung ist auch der Begriff der geographischen oder auch geodätischen Koordinaten (Torge, 2003, Seite 89) zu finden.

3.1.2 Parametersysteme in der Abbildungsebene

Das Gauß-Krüger-System als aktuelles amtliches Koordinatensystem der Landesvermessungen ist als zweidimensionales Koordinatensystem realisiert, da das Landessystem eine strikte Trennung von Lage und Höhe vollzieht. Es beschreibt ein Festpunktfeld auf der Grundlage des im Zentralpunkt Rauenberg auf dem Bessel-Ellipsoid gelagerten Deutschen Hauptdreiecksnetzes und ist als erdfestes System anzusehen. Die nach Norden ausgerichtete Hochachse des Systems wird mit dem Index H bezeichnet, seine in der GK-Ebene orthogonal dazu angeordnete Rechtsachse mit R. Zur Abbildung der dreidimensionalen Koordinaten in die Ebene wird eine konforme Mercator-Projektion verwendet, deren Abbildungsvorschriften in weiterführenden Quellen (Schödlbauer 1982 Seite 19 ff.) zu finden sind.
Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass die im Gauß-Krüger-System vorgehaltenen Koordinatensätze in Niedersachsen ab 2007 in das UTM-System überführt werden.

3.1.3 Lokales topozentrisches System

Das lokale topozentrische System ist ähnlich wie das ECEF-System erdfest und somit invariant gegenüber der Erddrehung. Seine Lagerung erfolgt beliebig, meist jedoch in einem Punkt auf oder in der Nähe der Erdoberfläche, da es häufig zur Referenzierung von Zwischenergebnissen geodätischer Berechnungen verwendet wird. Seine X-Achse zeigt nach Norden, seine Y-Achse nach Osten und seine Z-Achse entspricht bei Definition auf einem Ellipsoid dem Vektor der ellipsoidischen Höhe (vergleiche Abbildung 3.2).

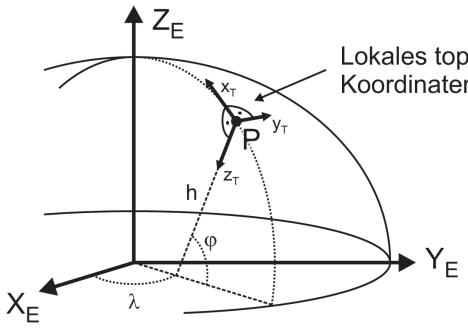


Abbildung 3.2: Lokales topozentrisches Koordinatensystem

Bei rechtshändigen Systemen zeigt die Z-Achse in Nadir-, bei linkshändigen Systemen in Zenitrichtung, wobei die erstgenannte Variante aufgrund der einfacheren Transformierbarkeit häufig bevorzugt wird (Hofmann-Wellenhof u. a., 2003). Bedingt durch diese Definition spricht man bei der Realisierung lokaler topozentrischer Systeme häufig von einem ellipsoidisch tangentialen Rahmen.

3.1.4 Body-System

Als Body-Systeme werden in der Regel objekt- oder sensorbezogene Koordinatensysteme bezeichnet, die in rechtshändiger kartesischer Form definiert sind. Das Fahrzeugsystem in Abbildung 3.3 ist eine spezielle Form eines Body-Systems und wird zur gegenseitigen Positionierung und Ausrichtung der einzelnen Sensorsysteme zueinander und im Bezug zum Fahrzeug verwendet.
Die Festlegung von Ursprung und Achsen eines Body-Systems wird standardmäßig über den Massenschwerpunkt des Objektes sowie drehende Achsen vorgenommen. Das in der Automobilindustrie gebräuchlichste Fahrzeugkoordinatensystem hat seinen Ursprung im Schnittpunkt einer das Fahrzeug in Längsrichtung halbierenden Ebene mit der Vorderachse. Seine Koordinaten sollen an dieser Stelle aufgrund der abweichenden Definition als X', Y' *und* Z' bezeichnet werden. Die vordere Fahrzeugachse bildet hierbei die Y'_F-Achse des Systems und verläuft positiv zur rechten Fahrzeugseite. Die X'_F-Achse ist achsparallel der entgegengesetzten Fahrtrichtung, die Achse Z'_F verläuft in Zenitrichtung.

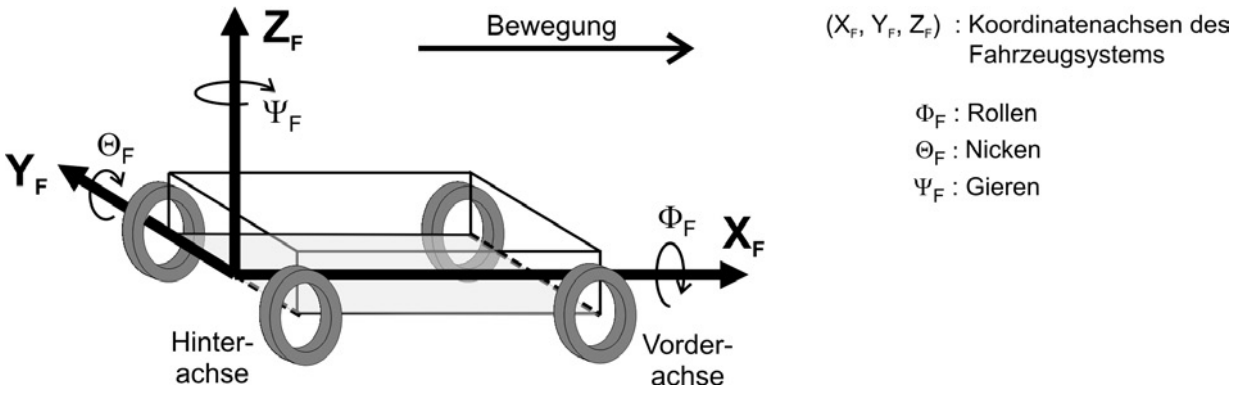


Abbildung 3.3: Fahrzeugkoordinatensystem

Im vorliegenden Fall wird das Fahrzeugsystem jedoch nicht im Schnittpunkt mit der Vorderachse, sondern mit der Hinterachse gelagert, was die Bestimmung der Orientierungsparameter des Fahrzeuges erleichtert (Kapitel 3.7.3). Die Koordinatenachsen unterscheiden sich jedoch in der Weise, dass die X_F-Achse positiv in Fahrtrichtung und die Y_F-Achse positiv zur linken Fahrzeugseite zeigt. Die Z_F-Achse komplettiert das orthogonale rechtshändige System.
Änderungen der räumlichen Orientierung eines Body-Systems, in diesem Fall des Fahrzeuges, bezogen auf ein übergeordnetes Koordinatensystem, können als Drehwinkel um die jeweiligen Achsen beschrieben werden. In der vorliegenden Arbeit werden Drehungen um die X_F-Achse als Rollen (Winkel Φ_F), um die Y_F-Achse als Nicken (Winkel Θ_F) und um die Z_F-Achse als Gieren (Winkel Ψ_F) bezeichnet. Das Azimut α von Fahrzeug und Scanner bezeichnet den Gierwinkel zu einem erdfesten global geozentrischen System und wird wie folgt definiert (Torge, 2003):

> Das Azimut α ist der in der Horizontalebene gemessene Winkel zwischen der ellipsoidischen Meridianebene des Fahrzeugursprungs $P_{0,F}$ und der durch die Flächennormale in $P_{0,F}$ und den aktuellen Bewegungsvektor aufgespannten Vertikalebene. Das Azimut α zählt von Norden aus im Uhrzeigersinn.

Neben dem Fahrzeugsystem werden auch Sensoren durch Body-Systeme definiert, um die Anbringung von Kalibrierwerten zu beschreiben. Aufgrund von Drifterscheinungen sind derartige Body-Systeme unter Umständen zeitvariant zu formulieren. Die in diesem System verwendeten Body-Systeme können Tabelle 3.2 entnommen werden, ihre konkrete Definition erfolgt in Kapitel 6.

Sensor	**Bezeichnung**
Laserscanner	$\boldsymbol{X}_{B,Scan}$
GPS-Antenne	$\boldsymbol{X}_{B,GPS}$
Neigungsmesser	$\boldsymbol{X}_{B,Ink}$

Tabelle 3.2: Übersicht über die verwendeten Bodysysteme

3.2 Transformation der Messungen in ein Gebrauchskoordinatensystem

3.2.1 Grundlegende Vorgehensweise

Die mit dem vorgestellten Prototypen durchgeführte Umgebungserfassung hat zum Ziel, Koordinaten von gescannten Objektpunkten in einem für den Nutzer adäquaten Format und Koordinatensystem zu erzeugen. Die in Tabelle 3.1 gelisteten Systeme bilden hierbei die Grundlage für die Wahl eines Zielsystems. Für die spätere Nutzung der Daten ist ein solches System aus praktischen Gründen häufig als lokales Koordinatensystem auf Grundlage der Gauß-Krüger- oder UTM-Abbildung mit einem adäquaten Höhensystem realisiert. Ein solches Zielsystem bietet den erheblichen Vorteil, dass eine Nord-Süd-Ausrichtung und eine - zumindest näherungsweise - Orientierung an der Lotlinie möglich ist. Insbesondere bei Visualisierungen erschließt sich dem Nutzer hierdurch ein deutlich einfacherer Zugang zu den erfassten räumlichen Informationen.

Aus diesem Grund erscheint die Gauß-Krüger-Ebene mit einem noch zu wählenden Höhensystem als ideales System, um die erfassten Messungen einer späteren Nutzung zuzuführen, wobei durch Anpassung einiger Parameter auch die Transformation in UTM-Koordinaten ohne große Änderungen möglich ist. Bei Systemen, in denen eine Inertialmesseinheit (IMU) zum Einsatz kommt, wird eine Transformation der Sensordaten standardmäßig auf dem in Abbildung 3.4 dargestellten Weg durchgeführt.

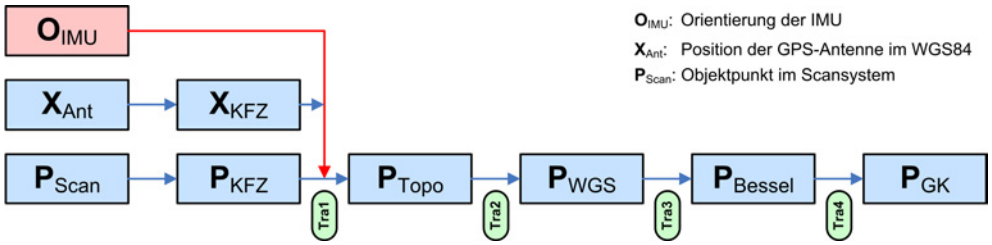


Abbildung 3.4: Transformation der Sensordaten mit Hilfe von IMU-Daten

Insbesondere für die Transformation vom Fahrzeugsystem in ein topozentrisches System ist die Kenntnis der zeitvarianten Drehwinkel zwischen beiden Systemen eine grundlegende Voraussetzung für die Transformation „Tra1“ (Abbildung 3.4). Im Unterschied zu Mobile-Mapping-Systemen mit Inertialmesseinheit werden bei dem vorliegenden System im Rahmen einer Messung jedoch lediglich die vier Parameter

$$\begin{bmatrix} X_{WGS} \\ Y_{WGS} \\ Z_{WGS} \\ \phi_F \end{bmatrix}, \text{Sensor:} \begin{bmatrix} \text{GPS} \\ \text{GPS} \\ \text{GPS} \\ \text{Inklinometer} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

erfasst. Aus diesem Grund kann eine Transformation vom Fahrzeugsystem in andere übergeordnete Systeme („Tra2“ bis „Tra4“, Abbildung 3.4) erst nach Ermittlung der fehlenden Parameter Gierwinkel Ψ_F und Nickwinkel Θ_F erfolgen. Diese können, wie in Kapitel 3.7.3 erläutert, aus dem geschätzten Zustandsvektor der Kalman-Filterung abgeleitet werden. Prinzipiell kann eine solche Filterung im WGS84- oder in einem beliebigen anderen System erfolgen. Da die Neigungsmessungen des Inklinometers, die den Rollwinkel Φ_F darstellen, zudem auf die Lotrichtung und nicht auf die Ellipsoidnormale des WGS84 bezogen sind, wird die Filterung in einem lokal bestanpassenden ellipsoidischen System, beziehungsweise seiner Projektion in die Ebene durch Gauß-Krüger Abbildung, vollzogen. Somit sind zunächst nur die Raumpositionen der GPS-Antenne zu transformieren.

Aus oben genannten Gründen wird zur Transformation der durch den Scanner erfassten Objektpunkte ein dreistufiger Ablauf vorgeschlagen (Abbildung 3.5):

1. Transformation der Antennenpositionen von WGS84 nach Gauß-Krüger (Kapitel 3.2.2, 3.2.3) mit optionaler Berücksichtigung des Antennenversatzes durch Umrechnung „UR1“ vom Antennen- in das Fahrzeugkoordinatensystem (Abbildung 3.5)
2. Ableitung der fehlenden Raumwinkel durch indirekte Berechnung „Ber1“ im Rahmen der Kalman-Filterung (Kapitel 3.7.3)
3. Transformation „Tra1“ der Scannerdaten über das Fahrzeugsystem in die Gauß-Krüger-Ebene

Diese Vorgehensweise führt zu dem in Abbildung 3.5 dargestellten Ablauf. Hierbei erfolgt die Transformation der GPS-Beobachtungen in die Gauß-Krüger-Ebene bereits vor der eigentlichen Kalman-Filterung und nicht erst nach Berechnung der Punktwolke. Der Grund hierfür liegt im Volumen der GPS-Beobachtungen, das signifikant geringer als das der gescannten Objektpunkte ist, wodurch der für die Transformation benötigte Rechenaufwand erheblich vermindert werden kann.

Im Rahmen der Filterung ist jedoch zu beachten, dass die Ableitung von Winkeln aus Einzelpunktpositionen („Ber1“, Abbildung 3.5) durch Einsatz eines Kalman-Filters (Kapitel 3.7.3) streng genommen nur zulässig ist, wenn das verwendete Fahrzeug Rotationen ausschließlich um den Ursprung des Koordinatensystems der GPS-Antenne durchführt. Eine solche Bedingung ist nur dann erfüllt, wenn die Koordinatensysteme X_F und $X_{B,GPS}$ einen identischen Ursprung besitzen. Da diese Forderung in der Praxis nur schwer einzuhalten ist und beim vorliegenden System der Laserscanner über dem Schnittpunkt zwischen Hinter- und Längsachse des Fahrzeuges befestigt ist, erfolgt in Kapitel 3.2.4 eine Abschätzung

der Auswirkungen eines translatorischen Versatzes zwischen X_F und $X_{B,GPS}$. Alternativ ist eine Umrechnung der durch die GPS-Beobachtungen abgeleiteten Azimute auf die Scannerposition durchzuführen („UR1“, Abbildung 3.5)

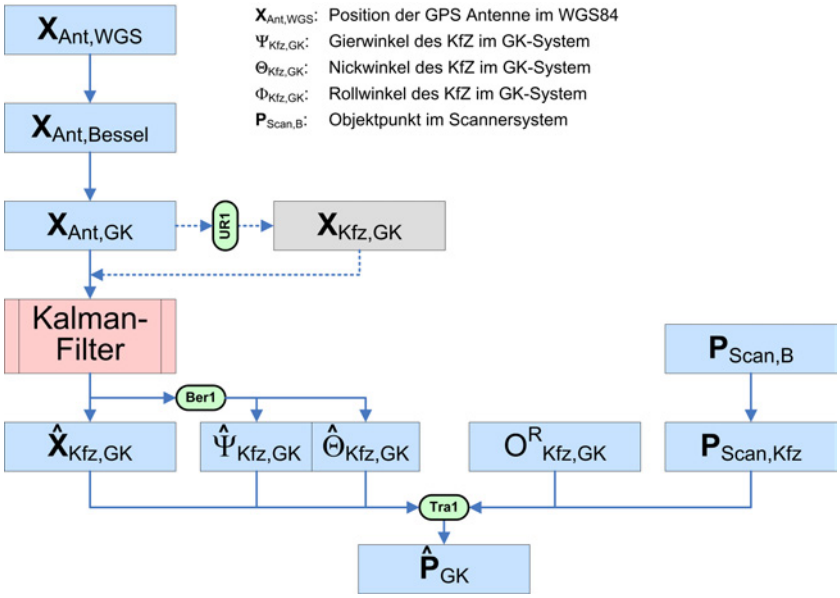


Abbildung 3.5: Transformation der Sensordaten ohne IMU-Daten

3.2.2 Transformation der GPS-Positionen

Zunächst sind die im WGS84-System (Kapitel 3.1.1) vorliegenden GPS-Beobachtungen mit Hilfe eines Datumsüberganges vom WGS84 auf das Bessel-Ellipsoid zu transformieren. Unter der Voraussetzung, dass eine Berücksichtigung der Ellipsoidparameter unterbleibt, kann dies mit Hilfe eines Maßstabsfaktors sowie drei Translations- und drei Rotationsparametern geschehen. Für kleine Winkel, wie sie in diesem Fall vorliegen, ergibt sich der kartesische Koordinatenvektor der Antennenposition auf dem Bessel-Ellipsoid durch:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{Bessel} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{WGS84}^{Bessel} + m \cdot \begin{pmatrix} 1 & \epsilon_z & -\epsilon_y \\ -\epsilon_z & 1 & \epsilon_x \\ \epsilon_y & -\epsilon_x & 1 \end{pmatrix}_{WGS84}^{Bessel} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84}, \tag{3.2}$$

mit

$$\epsilon_x,\ \epsilon_y,\ \epsilon_z : \textit{Drehwinkel von Bessel nach } WGS84$$

Anschließend sind die auf das Bessel-Ellipsoid bezogenen kartesischen Koordinaten in ihre ellipsoidische Darstellung zu übertragen, da eine Abbildung in die Ebene, sowohl für Gauß-Krüger als auch für UTM, von ellipsoidischen Koordinaten ausgeht. Diese Transformation wird in der Regel iterativ gelöst und kann der Standardliteratur entnommen werden (Torge, 2003, Seite 90). Unter Inkaufnahme von Restabweichungen, deren Größenordnung für die vorliegende Aufgabenstellung unkritisch ist, kann die benötigte Umrechnungsformel auch in geschlossener Form angegeben werden (Bowring, 1985).

3.2.3 Verebnung der ellipsoidischen Koordinaten

Ausgehend von den nun vorliegenden ellipsoidischen Koordinaten der Breite φ und der Länge λ eines Punktes P_i kann eine Gauß-Krüger-Abbildung in die Ebene nach Schödlbauer (1982) erfolgen. Hierzu werden die Parameter für die große Halbachse a_{Ell} und die Abplattung α_{Ell} des Referenzellipsoides sowie der Bezugsmeridian L_0 benötigt, die aus Platzgründen hier nur verkürzt wiedergegeben werden:

$$[R, H, h]_{i,GK} = f(\varphi, \lambda, a_{Ell}, \alpha_{Ell}, L_0)_{i,Bessel}. \tag{3.3}$$

Als Resultat dieser Abbildung erhält man die Gauß-Krüger-Koordinaten R und H sowie ihre Höhe. Die Höhenkomponente liegt als ellipsoidische Höhe h vor und kann durch ein Quasigeoidmodell wie das

GCG05 in Normalhöhen umgerechnet werden. Bei regional begrenzten Aufgabenstellungen sind hierbei Relativgenauigkeiten für die Bestimmung von Normalhöhen im Bereich weniger Zentimeter bis Dezimeter erzielbar (Torge, 2003, Seite 231). Kann auf einen absoluten Höhenbezug, wie im Fall der vorliegenden Aufgabenstellung, verzichtet werden, so sind grundsätzlich auch ellipsoidische Höhen zur Erfassung räumlich begrenzter Objekter nutzbar.

Für den Einsatz des Systems im Bereich Hannover ergeben sich relative Höhenabweichungen durch Nichtberücksichtigung des Quasigeoidmodells von bis zu 35 Millimeter je Kilometer Ausdehnung des Messgebietes, die sich näherungsweise auf der Grundlage der Quasigeoidgradienten des GCG05 grafisch ermitteln lassen (Liebsch, 2007). Hieraus wird deutlich, dass bei weiträumigen Erfassungsvorgängen in Bereichen mit großen Quasigeodgradienten eine Überführung der ellipsoidischen Höhen in Normalhöhen unumgänglich ist.

Da das Lagebezugssystem der niedersächsischen Landesvermessung aktuell auf die Universale Transversale Mercator-Abbildung (UTM) umgestellt wird (AdV, 2005), sei an dieser Stelle erwähnt, dass auch die UTM zugrunde liegenden Rechenvorschriften auf der gaußschen konformen Abbildung beruhen.

Die Unsicherheit der verebneten Koordinaten R und H eines Punktes sowie der ellipsoidischen Höhe ist mittels Varianzfortpflanzung nach bekanntem Schema zu bestimmen:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{GK,i} = \boldsymbol{J}^{GK}_{Bessel} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{Bessel,i} \cdot (\boldsymbol{J}^{GK}_{Bessel})^T \tag{3.4}$$

Hierbei kann die Jakobi-Matrix $\boldsymbol{J}^{GK}_{Bessel}$ unter Zuhilfenahme verschiedener Ellipsoidparameter wie folgt gebildet werden (Gräfe u. a., 2000):

$$\boldsymbol{J}^{GK}_{Bessel} = \begin{bmatrix} \frac{N}{V^2} & 0 & 0 \\ 0 & N \cdot \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \; mit \tag{3.5}$$

$$\eta^2 = \left(\frac{1}{(1-\alpha)^2} - 1 \right) \cdot \cos^2 \lambda \tag{3.6}$$

$$V = \sqrt{1+\eta^2} \tag{3.7}$$

$$N = \frac{a}{(1-\alpha) \cdot V} \tag{3.8}$$

3.2.4 Auswirkung des Versatzes zwischen Antenne und Fahrzeugnullpunkt

Die Messungen mit der GPS-Antenne auf dem vorgestellten Prototypen sollen in erster Linie dazu dienen, Position und Orientierung des Laserscanners zu jedem Zeitpunkt zu ermitteln. Die Adaptierung der Antenne ist jedoch mit einer Reihe von Einschränkungen verbunden, die im Folgenden näher erläutert werden sollen. Zum einen kann die Antenne weder über noch unter dem Laserscanner befestigt werden, um dessen Gesichtsfeld nicht einzuschränken, zum anderen sollten ihre Messungen geeignet sein, die Orientierung des Fahrzeuges und somit auch die des Laserscanners möglichst realitätsnah abzubilden.

Grundsätzlich ist hierbei zu beachten, dass eine Ableitung der Gier- und Nickwinkel aus Einzelpunktpositionen der GPS-Messung nur dann erfolgen kann, wenn die Bewegungen der Antenne ausschließlich in Richtung der Fahrzeuglängsachse geschehen. Eventuell auftretende Bewegungen quer zur Fahrtrichtung müssen zwangsläufig als Richtungsänderung aufgefasst werden. Praktisch bedeutet dies, dass mindestens drei Bedingungen an die Bewegung des Fahrzeuges und den GPS-Empfänger erfüllt sein müssen:

1. Die Tangente der durch GPS-Messungen bestimmten Trajektorie (roter Pfeil in Abbildung 3.6) muss möglichst genau mit der Längsachse des Fahrzeuges (grüner Pfeil in Abbildung 3.6) übereinstimmen.
2. Die Abtastrate des GPS-Empfängers muss im Verhältnis zur Geschwindigkeit so hoch gewählt werden, dass die zwischen zwei Positionen auftretende Sekantenhöhe über der Kurve klein im Verhältnis zur Sekantenlänge bleibt, die Diskretisierungsungenauigkeit also begrenzt wird.
3. Die Geschwindigkeit in Fahrzeuglängsrichtung v_L muss groß im Verhältnis zur Geschwindigkeit in Querrichtung v_Q sein ($v_L >> v_Q$).

Im Gegensatz zur Achsschenkellenkung, die bei Kraftfahrzeugen zum Einsatz kommt, wurde für die Realisierung dieses Prototypen ein Fahrzeug mit sogenannter Schwenkachslenkung verwendet. Hierbei ist die Vorderachse starr und kann zur Lenkung ausschließlich um ihren Mittelpunkt gedreht werden.

Das Koordinatensystem des Fahrzeuges wurde aus diesem Grund beim entwickelten Messsystem bewusst in den Schnittpunkt von Hinterachse, Längsachse und Vertikalrichtung gelegt. Werden Drifteffekte vernachlässigt, die ohnehin nur bei hohen Fahrgeschwindigkeiten auftreten, so vollzieht jedes vordergelenkte Fahrzeug alle Drehungen nur um diesen Punkt. Der Vorteil dieser Datumsfestlegung ist, dass die Tangente der Trajektorienpunkte (also die erste Ableitung der Trajektorie) bei differentieller Betrachtung immer in Richtung der Fahrzeuglängsachse zeigt.

Die durch Diskretisierung mit einem endlichen Abtastintervall hervorgerufene systematische Abweichung kann bei niedriger Fahrtgeschwindigkeit und unter Beachtung von Bedingung 2 vernachlässigt werden, wie die folgenden Simulationen zeigen. Da die mit Abstand größten Winkeländerungen in der Horizontalen geschehen, sollen die folgenden Betrachtungen exemplarisch am Beispiel des Gierwinkels vorgenommen werden.

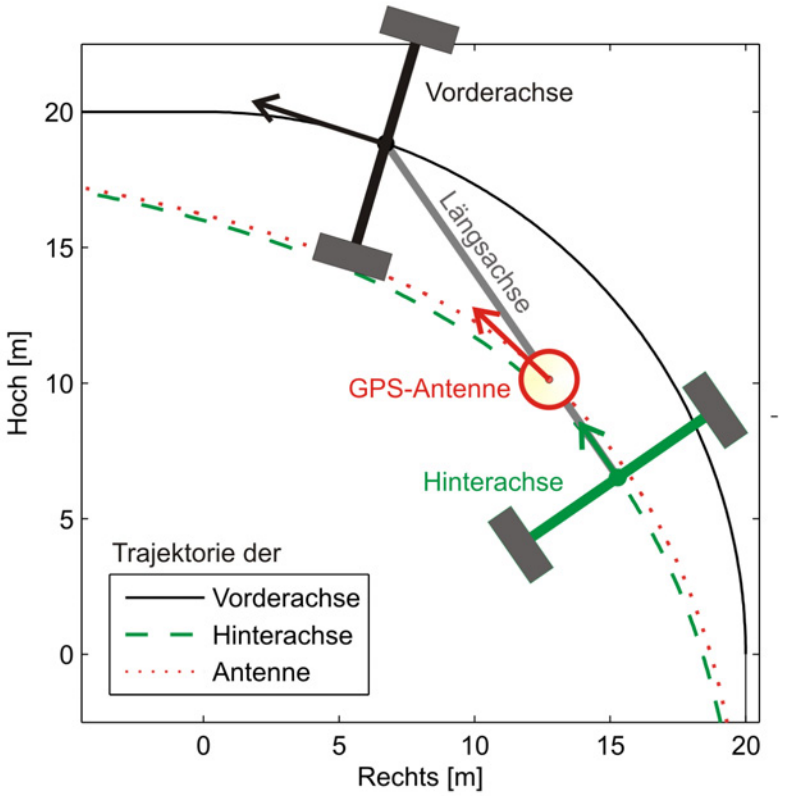


Abbildung 3.6: Trajektorien der Achsmittelpunkte bei Kurvenfahrt

Jedes vordergelenkte Fahrzeug mit einem Achsabstand d_A vollzieht mit seiner Hinterachse eine sogenannte „Schleppkurve“, wenn der Drehpunkt der Vorderachse eine Kurve mit der Krümmung $\kappa > 0$ durchläuft (Abbildung 3.6). Die Parameter der von der Hinterachse gefahrenen Schleppkurve sind bei vorgegebenem Radius nur vom Achsabstand abhängig und können mit Hilfe einfacher Differentialgleichungen berechnet werden (Gander und Hrebícek, 2004).

Aus Abbildung 3.6 ist gut zu ersehen, dass die Tangente eines Punktes, der sich mit dem Fahrzeug bewegt, umso weniger der Fahrzeuglängsachse entspricht, je weiter sich dieser Punkt vom Drehpunkt des Fahrzeuges auf der Hinterachse entfernt befindet. Diese Überlegung wird anhand eines Extrembeispiels deutlich, bei dem sich die Vorderachse auf einer Kreisbahn bewegt, die genau dem Achsabstand entspricht. Hierbei vollzieht der auf der Hinterachse gelegene Koordinatenursprung ausschließlich eine Drehung um die Z-Achse. Wird nun die Positionsbestimmung auf der Vorderachse durchgeführt, so steht die Tangente der Punktbewegung der Vorderachse senkrecht zur eigentlichen Fahrzeugachse. Aus diesen Ausführungen wird deutlich, dass systematische Effekte, die durch einen Versatz der GPS-Antenne entstehen, von den drei Parametern Achsabstand, Entfernung der GPS-Antenne vom Fahrzeugnullpunkt sowie vom

Kurvenradius abhängen.

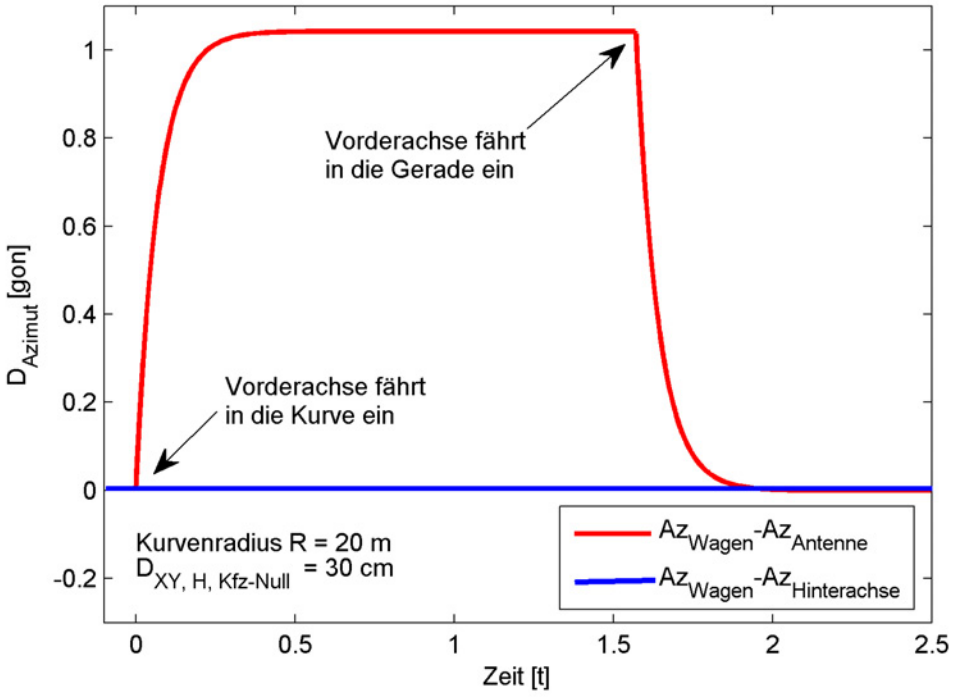


Abbildung 3.7: Berechnete Azimute und ihre Differenz vom wahren Azimut

Abbildung 3.7 zeigt die wahren Azimute des Fahrzeuges während einer Kreisbewegung und dem Einbiegen auf eine anschließende Gerade sowie die durch GPS-Messungen im Fahrzeugnullpunkt und mit einem Versatz abgeleiteten Azimute. Die hierzu verwendeten realen geometrischen Maßstäbe des verwendeten Prototypen zeigen, dass schon bei einem Horizontalversatz der GPS-Antenne aus dem Fahrzeugnullpunkt von $D_{XY,H,Kfz-Null} = 30$ cm mit systematischen Abweichungen im Azimut von bis zu 1.1 gon zu rechnen ist, wenn eine Kurve mit einem Radius von $R = 20$ m durchfahren wird.

Zur Kompensation der vorgestellten Effekte sind verschiedene Maßnahmen denkbar. Zum einen können prinzipiell zu enge Kurvenradien vermieden werden, die in Abhängigkeit von der geforderten Genauigkeit der Objektpunkte zu wählen sind. Zum anderen kann eine Positionsbestimmung mit Hilfe von zwei GPS-Empfängern erfolgen, die symmetrisch vor und hinter dem Fahrzeugnullpunkt angeordnet sind. Falls auf hiermit verbundene Redundanz der Positionsbestimmung verzichtet werden kann oder nur ein GPS-Empfänger vorhanden ist, können auftretende systematische Effekte rechnerisch kompensiert werden.

3.2.5 Transformation der Scanpunkte

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{Scan,GK} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}^{Kfz,GK}_{Scan,Body} + \boldsymbol{R}^{GK}_{Kfz} \cdot \boldsymbol{R}^{Kfz}_{Scan} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{Scan,Body} \tag{3.9}$$

Für eine Transformation zwischen zwei beliebigen rechtshändigen Koordinatensytemen kann jede Rotation um die Achsen X, Y und Z mit Hilfe der drei elementaren Drehmatrizen $\boldsymbol{R}_X(\psi)$, $\boldsymbol{R}_Y(\Theta)$ und $\boldsymbol{R}_Z(\phi)$ durchgeführt werden (Hofmann-Wellenhof u. a., 2001). Die Drehwinkel ψ, Θ, ϕ geben hierbei die positiven Drehungen um jede Achse im Uhrzeigersinn an und müssen vereinbarungsgemäß in festgelegter Reihenfolge durchgeführt werden. Die zusammengesetzte Drehmatrix, die auch auf Gleichung (3.9) angewendet werden kann, ergibt sich durch Multiplikation der Drehmatrizen von rechts nach links aus

$$\boldsymbol{R}^{GK}_{Kfz} = \boldsymbol{R}_Z(\phi) \cdot \boldsymbol{R}_Y(\Theta) \cdot \boldsymbol{R}_X(\psi). \tag{3.10}$$

Für die Aufstellung der elementaren Drehmatrizen zur Transformation des Fahrzeugsystems in das Gauß-Krüger-System werden die aus der Kalman-Filterung abgeleiteten Nick- und Gierwinkel, der hier identisch mit dem Azimut ist, sowie der aus Inklinometermessungen gewonnene Rollwinkel verwendet.

Ersetzt man die trigonometrischen Funktionen $\cos(\psi, \Theta, \phi)$ und $\sin(\psi, \Theta, \phi)$ durch ihre Kurzformen $c_{\psi,\Theta,\phi}$ und $s_{\psi,\Theta,\phi}$, führt dies zu den drei Drehmatrizen

$$\boldsymbol{R}_X(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & s_\psi \\ 0 & -s_\psi & c_\psi \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

$$\boldsymbol{R}_Y(\Theta) = \begin{bmatrix} c_\Theta & 0 & -s_\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s_\Theta & 0 & c_\Theta \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

$$\boldsymbol{R}_Z(\phi) = \begin{bmatrix} c_\phi & s_\phi & 0 \\ -s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

Die vollständige Drehmatrix $\boldsymbol{R}^{GK}_{Kfz}(\psi, \Theta, \phi)$ lautet somit

$$\boldsymbol{R}^{GK}_{Kfz}(\psi, \Theta, \phi) = \begin{bmatrix} c_\Theta\ c_\phi & s_\psi\ s_\Theta\ c_\phi\ + c_\psi\ s_\phi & c_\psi\ s_\Theta\ c_\phi + c_\psi\ s_\phi \\ -c_\Theta\ s_\phi & -s_\psi\ s_\Theta\ s_\phi + c_\psi\ c_\phi & c_\psi\ s\Theta\ s_\phi\ + s_\psi\ c_\phi \\ s_\Theta & -s_\psi\ c_\Theta & c_\psi\ c_\Theta \end{bmatrix}. \tag{3.14}$$

Für die Transformation des Scannersystems in das allgemeine Fahrzeugkoordinatensystem sind im vorliegenden Fall lediglich eine Drehung um die Z-Achse des Scanners sowie drei Translationen notwendig. Diese Vereinfachung ergibt sich aus einer sorgfältigen Horizontierung des Scanners und der X-Y-Ebene des Fahrzeugsystems im Labor. Der durch die individuelle Montage des Scanners auf dem Wagen unbekannte Rotationswinkel um die Z-Achse wird vor Beginn jeder Messung durch Erfassung einer mit Sollkoordinaten bestimmten Kugel im vorderen Teil des Fahrzeuges bestimmt (Kapitel 7.5.2). Um die Scanprofile orthogonal zur Bewegungsrichtung zu erfassen, wird der Scanner durch das Steuerprogramm RAMSYS-Control (Kapitel 8.2) in eine um 90° zur Fahrtrichtung gedrehte Position gebracht. Da die ermittelten Azimute auf die Ausrichtung des Fahrzeugs bezogen sind, muss diese zusätzliche Drehung bei einer Transformation der gescannten Punkte ins Fahrzeugkoordinatensystem berücksichtigt werden. Somit gilt für die Rotationsmatrix $\boldsymbol{R}^{Kfz}_{Scan}$ vom Scan- ins Fahrzeugsystem:

$$\boldsymbol{R}^{Kfz}_{Scan} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos(90°) & sin(90°) \\ 0 & -sin(90°) & cos(90°) \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{R}_Y \cdot \boldsymbol{R}_X \text{ mit } \boldsymbol{R}_Y, \boldsymbol{R}_X: \text{ Einheitsmatrix} \tag{3.15}$$

Als Alternative zur numerisch aufwendigen Berechnung der trigonometrischen Funktionen sin und cos bietet sich die Verwendung von Quaternionen an, durch die eine beliebige Drehmatrix mit Hilfe von vier Parametern dargestellt werden kann. Die Transformation mittels Quaternionen kann zum Beispiel Rogers (2000) und Rietdorf (2005) entnommen werden.

3.3 Bewegungsmodelle

Sowohl Interpretierbarkeit als auch Qualität der Ergebnisse einer Auswertung hängen wesentlich von der Wahl des zugrunde liegenden Modells, in diesem Fall des Bewegungsmodells, ab. Im Sinne der Systemtheorie wird zur Unterscheidung verschiedener Ansätze der Begriff des Systems verwendet. Diese Einordnung erscheint hier jedoch weniger angemessen, da hier die Betrachtung der konkreten Zusammenhänge zur Beschreibung einer Bewegung im Vordergrund steht.

Wie im Rahmen der Formulierung des Filteransatzes (Kapitel 3.4.1) diskutiert, sind die theoretischen Ansätze zur Beschreibung von Deformationen und Fahrzeugbewegungen ähnlich. So können die in der Deformationsanalyse nach DIN 18710 (DIN, 2002) verwendeten Modelle mit kleineren Einschränkungen auch zur Modellierung der hier stattfindenden Fahrzeugbewegung herangezogen werden. Hierbei erfolgt im Wesentlichen eine Unterscheidung zwischen Modellen, welche die Ursachen (Einflussgrößen) berücksichtigen, die zu einer Zustandsänderung des Systems führen, und denjenigen, die sich ausschließlich auf eine Beschreibung des Systemverhaltens beschränken. Sie werden als deskriptive Modelle im Unterschied zu erstgenannten kausalen Modellen bezeichnet. In Anlehnung an die in Welsch u. a. (2000) gezeigte

Einordnung von Modellen der technischen Mechanik kann die aus der DIN 18710 bekannte Eingruppierung modifiziert werden (Abbildung 3.8).

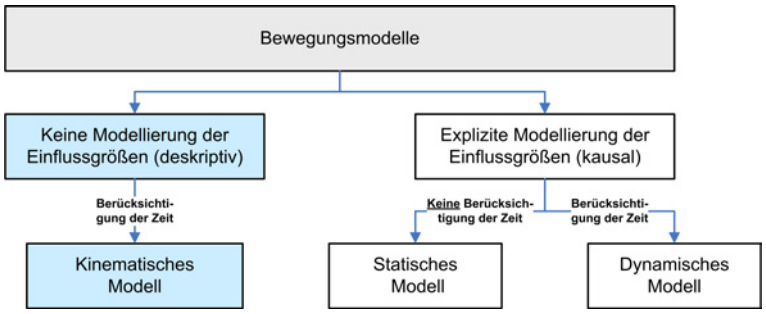


Abbildung 3.8: Ansätze zur Bewegungsmodellierung

Die Modellierung des Systemverhaltens in Abhängigkeit von der Zeit ist für das vorliegende System von essentieller Bedeutung, da die Integration der Messwerte verschiedener Sensoren - insbesondere des Laserscanners - ausschließlich über die Zeit geschehen kann. Somit kommen für die Modellierung kinematische und dynamische Ansätze in Frage, von denen die dynamischen eine explizite Berücksichtigung derjenigen Einflussgrößen vornehmen, die das Systemverhalten bestimmen. Da im vorliegenden Fall lediglich eine beschreibende Modellierung des Bewegungsverhaltens gefordert ist, kann eine Modellierung mit Hilfe des kinematischen Ansatzes erfolgen. Beispiele für die Nutzung dynamischer Modelle geben Kuhlmann (1996), Eichhorn (2005) und Eichhorn (2007).

3.4 Filteralgorithmen

3.4.1 Kalman-Filter

Eine nicht nur in der Geodäsie gestellte Aufgabe besteht in der Bestimmung des Zustands linearer Systeme unter Zuhilfenahme von Messungen, die durch lineare oder linearisierte Funktionen der Systemzustände beschrieben werden. Der gesuchte Systemzustand wird hierbei in diskreter Formulierung durch seinen Zustandsvektor $\boldsymbol{y}_k$ zur Epoche k beschrieben.

Naturgemäß sind Messungen für die Ermittlung des Zustandsvektors mit systematischen und zufälligen Messabweichungen behaftet, die eine Bestimmung des Schätzwertes für den wahren Wertes des Systemzustandes erschweren. Während die systematischen Messabweichungen vor der eigentlichen Auswertung durch geeignete Wahl der Messanordnung oder durch modellbasierte Korrektion so weit wie möglich auszuschalten sind, lässt sich der Einfluss zufälliger Abweichungen durch die Verwendung sogenannter Filter-Verfahren minimieren. Eines der am häufigsten verwendeten Filter ist das nach seinem Erfinder Rudolf Emil Kalman benannte Kalman-Filter (Kalman, 1960) für diskrete, beziehungsweise das Kalman-Bucy-Filter für kontinuierliche Systeme. Seinem Wesen nach stellt das Kalman-Filter ein sequentielles Ausgleichungsverfahren dar, das für verschiedene, auch robuste, Schätzer realisiert ist.

Vorrangiges Ziel einer Filterung ist es, einen Schätzwert $\hat{\boldsymbol{y}}_k$ für den Zustandsvektor $\boldsymbol{y}_k$ unter Einbindung aller ermittelten Messwerte $\boldsymbol{l}_k$ zu finden. Hierbei zeigt sich das Wesen der Kalman-Filterung, das in der parallelen Behandlung von theoretischer und empirischer Systemanalyse besteht. Durch Kombination von Mess- und Systemgleichung im Rahmen der Kalman-Filterung werden ein optimaler Schätzwert für den Systemzustand und seine Varianz-Kovarianz-Matrix (VKM) bestimmt.

Die Besonderheit sequentieller Ausgleichungsverfahren wie der Kalman-Filterung besteht darin, dass nicht nur Messungen der aktuellen Epoche zur Schätzung des Systemzustandes beitragen, sondern alle bisher erfassten Werte. Konkret zeigt sich diese Eigenschaft darin, dass zur optimalen Schätzung des ausgeglichenen Zustandsvektors $\hat{\boldsymbol{y}}_n$ einer beliebigen Epoche n alle im Vektor $\boldsymbol{l}_i$ zusammengefassten Beobachtungen und ihre VKM

$$\boldsymbol{l}_1, \boldsymbol{l}_2, \boldsymbol{l}_3, ..., \boldsymbol{l}_n \tag{3.16}$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ll,1}, \boldsymbol{\Sigma}_{ll,2}, \boldsymbol{\Sigma}_{ll,3}, ..., \boldsymbol{\Sigma}_{ll,n} \tag{3.17}$$

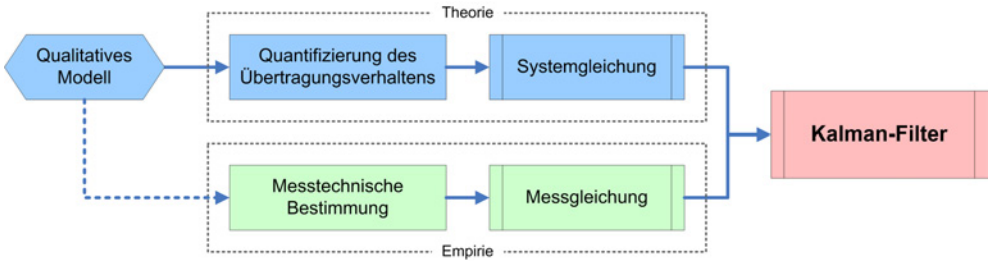


Abbildung 3.9: Zusammenführung von Mess- und Systemgleichung im Kalman-Filter (Welsch u. a., 2000)

der Epochen 1..n dazu verwendet werden, um $\hat{y}_n$ zu ermitteln. Hierbei ist es nicht zwingend notwendig, dass in jeder Epoche Messungen für alle zu beobachtenden Größen anfallen. Dieser Umstand wird insbesondere beim vorliegenden System dazu genutzt, Systemzustände für Epochen zu erzeugen, in denen lediglich Scanprofile erfasst wurden, um diese räumlich zuzuordnen.

Durch Messwerte ermittelter Zustand $\hat{y}_i$	**Art der Bestimmung**
$i = n$	Filterung
$i > n$	Prädiktion
$1 \leq i < n$	Glättung

Tabelle 3.3: Filterung, Prädiktion und Glättung

Ausgehend vom Umfang des Datenmaterials, das zur Bestimmung eines Systemzustandes verwendet wird, können die Begriffe Filterung, Prädiktion und Glättung, wie in Tabelle 3.3 angegeben, unterschieden werden.

Hierbei ist zu beachten, dass im Rahmen einer Kalman-Filterung aufgrund des aufgestellten funktionalen Modells nicht nur die Filterung der Daten, sondern auch eine Prädiktion des Systemzustandes über die aktuelle Epoche hinaus vorgenommen werden kann. Ein System, dessen Zustände mit Hilfe eines Kalman-Filters bestimmt werden sollen, muss nach Schrick (1977) folgende Optimalitätskriterien erfüllen:

1. Linearität
2. Erwartungstreue
3. Stabilität
4. Minimale Fehlervarianz

Bei geodätischen Fragestellungen wie der vorliegenden sind primär die dreidimensionalen Punktkoordinaten in Abhängigkeit von der Zeit t von Interesse. Eine solche Formulierung des Systemverhaltens wird als kinematisches Modell bezeichnet (Kapitel 3.3), bei dem der jeweilige Systemzustand durch n-dimensionale (hier n=3) Vektoren des Ortes $\boldsymbol{x}(t_k)$, der Geschwindigkeit $\dot{\boldsymbol{x}}(t_k)$ und der Beschleunigung $\ddot{\boldsymbol{x}}(t_k)$ eines oder mehrerer Punkte dargestellt werden kann.

Für den in dieser Arbeit relevanten Fall räumlicher Koordinaten enthalten die Vektoren $\boldsymbol{x}(t_k)$, $\dot{\boldsymbol{x}}(t_k)$ und $\ddot{\boldsymbol{x}}(t_k)$ die dreidimensionalen Parameter-Tripel

$$\boldsymbol{x}(t_k) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad : \; Koordinatenvektor \tag{3.18}$$

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t_k) = \left(\frac{dx}{dt}\right) = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad : \; Geschwindigkeitsvektor \tag{3.19}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}}(t_k) = \left(\frac{d^2x}{d^2t}\right) = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \; : \; Beschleunigungsvektor \tag{3.20}$$

Eine solche Formulierung berücksichtigt lediglich die erste und zweite Ableitung des Ortes und setzt somit eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung zwischen zwei Abtastzeitpunkten voraus. Diese Bedingung wird in der Praxis nicht immer streng zu erfüllen sein, dennoch kann bei geringen Geschwindigkeiten oder wahlweise hohen Abtastraten unter Inkaufnahme geringer Abweichungen von der Gültigkeit des Modells ausgegangen werden. Zur Vereinfachung wird der Zustand eines Punktes zum Zeitpunkt t_k auf Grundlage der Vektoren aus den Gleichungen (3.18), (3.19), (3.20) in einem gemeinsamen Vektor zusammengefasst:

$$\boldsymbol{y}(t_k) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(t_k) \\ \dot{\boldsymbol{x}}(t_k) \\ \ddot{\boldsymbol{x}}(t_k) \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Die Bestimmung des gesuchten ausgeglichenen Zustandsvektors $\hat{\boldsymbol{y}}_k$ erfolgt im Kalman-Filter zweistufig: In einer ersten Stufe werden die Parameter des aktuellen Zustands zum Zeitpunkt t_k aus dem Zustand der vorigen Epoche t_{k-1} prädiziert. Werden die Zeitdifferenz zwischen aktueller und neu zu bestimmender Epoche mit $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ und der Einheitsvektor mit E bezeichnet, ergibt sich der prädizierte und ungestörte Zustandsvektor $\bar{\boldsymbol{y}}_k$ in Matrizenschreibweise durch

$$\bar{\boldsymbol{y}}_k = \begin{vmatrix} \boldsymbol{x}_k \\ \dot{\boldsymbol{x}}_k \\ \ddot{\boldsymbol{x}}_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{E} & \Delta t \cdot \boldsymbol{E} & \frac{1}{2}\Delta t^2 \cdot \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{E} & \Delta t \cdot \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{E} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \boldsymbol{x}_{k-1} \\ \dot{\boldsymbol{x}}_{k-1} \\ \ddot{\boldsymbol{x}}_{k-1} \end{vmatrix} \tag{3.22}$$

$$\bar{\boldsymbol{y}}_k = \boldsymbol{T}_{k-1,k} \cdot \hat{\boldsymbol{y}}_{k-1}$$

mit der entsprechenden VKM

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\bar{y}\bar{y},k} = \boldsymbol{T}_{k-1,k} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{y}\hat{y},k-1} \cdot \boldsymbol{T}_{k-1,1}^T. \tag{3.23}$$

Die Matrix $\boldsymbol{T}$ wird auch als Transitions- oder Prädiktionsmatrix bezeichnet und beinhaltet Differential- oder Differenzengleichungen, mit Hilfe derer der Übergang von einem ausgeglichenen Systemzustand $\hat{\boldsymbol{y}}_{k-1}$ zum prädizierten Folgezustand $\bar{\boldsymbol{y}}_k$ erfolgen kann. Der im Rahmen der Prädiktion ermittelte Zustandsvektor weicht in der Regel aus mehreren Gründen vom tatsächlichen Zustand des Systems ab:

1. Bereits der Anfangszustand $\boldsymbol{y}_0$ besitzt eine in $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{y}\hat{y},0}$ enthaltene Unsicherheit, die dazu führt, dass auch sämtliche Folgezustände mit einer Unsicherheit behaftet sind. Im Laufe der Filterung verringert sich ohne Eingriff in das stochastische Modell die Varianz des Zustandes durch Einbeziehung von Messungen und die Aufdatierung des Systemzustandes und seiner VKM.

2. Das Systemverhalten - in diesem Fall die Bewegung eines Fahrzeuges - ist einer Vielzahl äußerer Einflüsse ausgesetzt. Einflüsse wie Über- oder Untersteuern, Schlupf, Achsfehlstellungen, Seitenwind oder nicht modelliertes Fahrverhalten sind in ihrer Wirkungsweise zwar mehrheitlich bekannt, ihre Größenordnung kann jedoch meist nicht mit vertretbarem Aufwand quantifiziert werden. Aufgrund dieser Imperfektion der mathematischen Modellierung des Systemverhaltens in der Matrix $\boldsymbol{T}_k$ schlägt Pelzer (1988) vor, den prädizierten Zustandsvektor in Gleichung (3.22) künstlich mit einer additiven Störbeschleunigung $\boldsymbol{w}_{k-1,k}$ zu überlagern.

3. Als dritte Komponente der Abweichung zu den gemessenen Systemzuständen ist schließlich die Unsicherheit der Messungen $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$ selbst zu nennen, da diese ebenfalls Einfluss auf die Prädiktion des Zustandsvektors besitzt.

Die unter 2. genannte Störbeschleunigung $\boldsymbol{w}_{k-1,k}$ überlagert den prädizierten Zustand $\bar{\boldsymbol{y}}_k$, so dass sich mit Hilfe der Störgrößenmatrix $\boldsymbol{C}_{k-1,k}$, deren Herleitung Pelzer (1987) entnommen werden kann, ein gestörter Zustandsvektor $\bar{\boldsymbol{y}}_k^*$ berechnen lässt:

$$\bar{\boldsymbol{y}}_k^* = \bar{\boldsymbol{y}}_k + \boldsymbol{C}_{k-1,k} \cdot \boldsymbol{w}_{k-1,k} \tag{3.24}$$

Für die Störbeschleunigung gilt ein Erwartungswert von $E(\boldsymbol{w}_{k-1,k}) = \mathbf{0}$, seine VKM muss auf geeignete Weise abgeschätzt werden und ergibt sich aus:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ww,k} = E(\boldsymbol{w}_{k-1,k} \cdot \boldsymbol{w}_{k-1,k}^T) \tag{3.25}$$

In der Praxis wird die Störbeschleunigung jedoch als Pseudobeobachtung mit $\boldsymbol{w}_{k-1,k} = \mathbf{0}$ in Gleichung (3.24) eingeführt, da ihre Größenordnung nicht bestimmt werden kann, so dass die Störbeschleunigung bei der Ermittlung des Zustandsvektors $\bar{\boldsymbol{y}}_k^*$ ohne Auswirkung bleibt und für die weiteren Berechnungen $\bar{\boldsymbol{y}}_k^* = \bar{\boldsymbol{y}}_k$ gesetzt werden kann. Demgegenüber wird die Unsicherheit des prädizierten und gestörten Zustandsvektors durch die Unsicherheit der Störbeschleunigung im Rahmen einer Varianzfortpflanzung zusätzlich erhöht (Pelzer, 1988):

$$L = \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{y}^*\bar{y}^*,k} = \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{y}\bar{y},k} + \boldsymbol{C}_{k-1,k} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{ww,k-1} \cdot \boldsymbol{C}_{k-1,k}{}^T \tag{3.26}$$

Nach der erfolgten Prädiktion des Zustandsvektors vollzieht die zweite und wichtigste Stufe des Kalman-Filters die Integration der Messwerte in das Schätzergebnis. Im Sinne der Filtertheorie erfolgt in diesem Schritt die Zusammenführung von Mess- und Systemgleichung zu

$$\begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{y}}_k \\ \hat{\boldsymbol{l}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{y}}_k \\ \boldsymbol{l}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_y \\ \boldsymbol{v}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{A} \end{bmatrix} \cdot \hat{\boldsymbol{y}}_k \tag{3.27}$$

Das entsprechende stochastische Modell in Form der VKM $\boldsymbol{\Sigma}_{LL,k}$ lautet

$$\boldsymbol{\Sigma}_{LL,k} = {\sigma_0}^2 \boldsymbol{Q}_{LL,k} = {\sigma_0}^2 \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q}_{yy,k} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{Q}_{ll,k} \end{bmatrix}, \tag{3.28}$$

mit

$\boldsymbol{Q}_{ll,k}$: Kofaktormatrix der Beobachtungen.

Auf die explizite Herleitung der Normalgleichungen sowie deren Lösung wird an dieser Stelle verzichtet. Eine ausführliche Darstellung aller Rechenformeln kann der Fachliteratur entnommen werden (Pelzer, 1988), (Haykin, 2001) sowie (Schrick, 1977).

Zum besseren Verständnis der Kalman-Filterung und der aufzustellenden Testgrößen soll stattdessen näher auf den logischen Ablauf des Filterprozesses eingegangen werden.

Zur Ermittlung des optimalen Schätzergebnisses für den Zustandsvektor werden zunächst die ermittelten Messwerte mit dem prädizierten Beobachtungsvektor $\bar{\boldsymbol{l}}_k$ verglichen. Dieser kann mit Hilfe der in der Matrix $\boldsymbol{A}_k$ enthaltenen mathematischen Beziehungen aus dem Zustandsvektor $\bar{\boldsymbol{y}}_k$ abgeleitet werden.

Die Differenz, die sich aus diesem Vergleich ergibt, wird im Sinne der Kalman-Filterung als Innovation

$$\boldsymbol{d}_k = \boldsymbol{l}_k - \boldsymbol{A}_k \cdot \bar{\boldsymbol{y}}_k = \boldsymbol{l}_k - \bar{\boldsymbol{l}}_k \tag{3.29}$$

bezeichnet und im Folgenden zur Aufdatierung des Zustandsvektors verwendet. Ihre VKM sowie die dazugehörige Kofaktormatrix ergeben sich aus:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{dd,k} = \sigma_0^2 \cdot \boldsymbol{Q}_{dd,k} = \boldsymbol{\Sigma}_{ll,k} + \boldsymbol{A}_k \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{y}\bar{y},k} \cdot \boldsymbol{A}_k^T \tag{3.30}$$

Darüber hinaus kann nun auch die Varianz der Gewichtseinheit zur Epoche k bei n_k vorliegenden Beobachtungen mit

$$\hat{\sigma}_{0,k}^2 = \frac{\boldsymbol{d_k}^T \cdot \boldsymbol{Q}_{dd,k}^{-1} \cdot \boldsymbol{d_k}}{n_k} \tag{3.31}$$

angegeben werden. Die Anzahl der Beobachtungen entspricht hierbei der Anzahl der Freiheitsgrade f_k, da jede Beobachtung einen zusätzlichen Freiheitsgrad im Ausgleichungsmodell erzeugt. Über die Größen $\boldsymbol{d}_k$ und $\boldsymbol{\Sigma}_{dd,k}$ kann die Verträglichkeit zwischen dem über die Systemgleichung prädizierten Zustandsvektor und dem über die Messgleichung ermittelten Systemzustand mit Hilfe von Testverfahren (Kapitel 3.4.2) überprüft werden.

Die Unterschiede zwischen prädiziertem und aus Messungen ermitteltem Systemzustand können nun mit Hilfe einer Gewichtsfunktion $\boldsymbol{K}$, der sogenannten Verstärkungsmatrix

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{y}^*\bar{y}^*,k} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_k^T \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{dd,k}^{-1} \tag{3.32}$$

dazu verwendet werden, den prädizierten Zustandsvektor aufzudatieren. Die Matrix $\boldsymbol{K}$ ergibt sich aus den Optimalitätskriterien bezüglich Varianzminimierung und Erwartungstreue des Filters. Auf ihre Herleitungs soll jedoch an dieser Stelle verzichtet werden. Aus der Aufdatierung ergibt sich der ausgeglichene Zustandsvektor $\hat{\boldsymbol{y}}_k$:

$$\hat{\boldsymbol{y}}_k = \bar{\boldsymbol{y}} + \boldsymbol{K}_k \cdot \boldsymbol{d}_k \tag{3.33}$$

Aufgrund der Berücksichtigung neuer Messungen zur Verbesserung des prädizierten Zustandsvektors ist zu erwarten, dass die Unsicherheit des ausgeglichenen Zustandsvektors kleiner als die des prädizierten ist. Hierbei ergibt sich die VKM des ausgeglichenen Zustandsvektors nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz wie folgt:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{y}\hat{y},k} = \boldsymbol{\Sigma}_{\bar{y}^*\bar{y}^*,k} - \boldsymbol{K}_k \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{dd,k} \cdot \boldsymbol{K}_k^T \tag{3.34}$$

Durch das Vorliegen der durch die Gleichungen (3.33) und (3.34) bestimmten Größen ist ein vollständiger Filterschritt vollzogen.

3.4.2 Statistische Bewertung der Innovation

Trotz sorgfältiger Durchführung aller Messungen und präziser Formulierung des Systemverhaltens muss bei einer Filterung stets in Betracht gezogen werden, dass entweder die Messungen mit größeren Abweichungen behaftet sind oder das in Gleichung (3.24) definierte Übertragungsverhalten des Systems vom tatsächlichen Systemverhalten abweicht.

Wie Pelzer (1987) zeigt, eignet sich der in (3.29) aufgestellte Innovationsvektor $\boldsymbol{d}_k$ einer Epoche sehr gut zur Analyse der Abweichungen, da er den Widerspruch zwischen dem vorliegenden Beobachtungsmaterial und dem prädizierten Zustandsvektor enthält. Unter Voraussetzung eines normalverteilten Innovationsvektors ergibt sich die Nullhypothese

$$H_0: \; E\{\boldsymbol{d}_k\} = E\{\boldsymbol{l}_k\} - \boldsymbol{A}_k \; E\{\bar{\boldsymbol{y}}_k\} = \boldsymbol{0}. \tag{3.35}$$

Hieraus lässt sich mit Hilfe der $\chi^2_{n_k}$-verteilten Testgröße

$$\boldsymbol{d}_k^T \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{dd,k}^{-1} \cdot \boldsymbol{d}_k \sim \chi^2_{n_k} \tag{3.36}$$

ein globaler Verträglichkeitstest durchführen. Für den Fall, dass der Verträglichkeitstest eine signifikante Innovation offenbart, ist diese mit Hilfe weiterführender Testverfahren zu bestimmen. Laut Pelzer (1987) sollten an die Bestimmung der Unverträglichkeit nicht allzu strenge Anforderungen gestellt werden.

Grundsätzlich kann eine Unverträglichkeit, wie aus Gleichung (3.29) ersichtlich ist, durch den Beobachtungsvektor $\boldsymbol{l}_k$ oder den prädizierten Zustandsvektor $\bar{\boldsymbol{y}}_k$ verursacht werden. Die Frage, ob zunächst das Beobachtungsmaterial zu prüfen oder das stochastische Modell zu hinterfragen ist, kann nicht allgemein beantwortet werden. Sie hängt wesentlich von den verwendeten Parametern ab und ist somit auf der Grundlage von Erfahrungswerten abzuwägen.

Da insbesondere bei der Verwendung von GPS-Beobachtungen grobe Fehler im Datenmaterial aufgrund verschiedener Einflüsse wie Multipath auftreten können, soll zunächst der Beobachtungsvektor mit Hilfe eines multiplen t-Tests (Koch, 2004) dahingehend untersucht werden, ob ein grober Fehler in den Beobachtungen $\boldsymbol{l}_i$ einer Epoche k enthalten ist. Werden der Verbesserungsvektor der Beobachtungen mit $\boldsymbol{v_l}$ und der Selektionsvektor der j-ten Beobachtung mit $\boldsymbol{e}_j$ bezeichnet, so lautet die aufzustellende Testgröße:

$$\frac{1}{\sigma_0} \frac{-\boldsymbol{e}_j^T \; \boldsymbol{Q}_{ll,k}^{-1} \; \boldsymbol{v}_l}{\sqrt{\boldsymbol{e}_j^T \; \boldsymbol{Q}_{ll,k}^{-1} \; \boldsymbol{Q}_{v_l v_l} \; \boldsymbol{Q}_{ll,k}^{-1} \; \boldsymbol{e}_j}} \sim N(0,1) \tag{3.37}$$

mit

$$\boldsymbol{Q}_{v_l v_l} = \boldsymbol{Q}_{ll,k} - \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{Q}_{\hat{y}\hat{y},k} \boldsymbol{A}_k^T,$$

$\boldsymbol{e}_j$: Selektionsvektor der Beobachtung j

Werden grobe Fehler in den Beobachtungen detektiert, sollte die Verwendung des Messwertes im jeweiligen Filterschritt verhindert werden, indem die korrespondierende Zeile der Designmatrix $\boldsymbol{A}$ durch einen Nullvektor ersetzt wird. Hierdurch hat eine solche Beobachtung weder Einfluss auf die Innovation (3.29) noch auf die Verstärkungsmatrix (3.32) und wird somit nach Gleichung (3.33) nicht zur Aufdatierung des Zustandsvektors verwendet.

Können hingegen keine groben Fehler im Beobachtungsmaterial festgestellt werden, so sind die Verbesserungen des prädizierten Zustandsvektors $\boldsymbol{v}_k = \hat{\boldsymbol{v}}_k - \bar{\boldsymbol{v}}_k^*$ näher zu untersuchen. Praktisch bedeutet dies, dass das angenommene Modellverhalten zum Beispiel durch eine der Ursachen von der Realität abweicht, die in Kapitel 3.4.1 genannt wurden. Da Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Punktes in jeder Koordinatenrichtung stark korreliert sind, erscheint es sinnvoll, den auf die Koordinatenrichtung bezogenen Subvektor der Verbesserung

$$\boldsymbol{v}_i = \begin{bmatrix} v_{x,i} \\ v_{\dot{x},i} \\ v_{\ddot{x},i} \end{bmatrix} \tag{3.38}$$

zusammenhängend zu testen. Für diese Fragestellung kann eine F-verteilte Testgröße formuliert werden (Pelzer, 1987). Bezeichnet *dim* die Dimension des Zustandsvektors, so lautet diese:

$$\frac{\boldsymbol{v}_i^T \cdot \boldsymbol{Q}_{ii}^{-1} \cdot \boldsymbol{v}_i}{\sigma_0^2} \sim \chi^2_{3dim} \tag{3.39}$$

Eine ermittelte Modellstörung kann dadurch berücksichtigt werden, dass die Varianz der Störbeschleunigung für a_x, a_y oder a_z (Formel 3.20) in $\boldsymbol{\Sigma}_{aa,k}$ erhöht und der gesamte Filterschritt wiederholt wird. Der Betrag für die additive Varianz der Störbeschleunigung sollte aufgrund von Erfahrungswerten festgelegt werden.

Zu beachten ist insbesondere, dass die hierüber eingeführte Unsicherheit nachhaltige Wirkung auf die VKM des ausgeglichenen Zustandes hat (3.34). So werden durch diesen Eingriff in das stochastische Modell theoretisch die Varianzen aller Folgeepochen für den ermittelten Parameter beeinflusst. Praktisch betrachtet verändert sich durch die Erhöhung der Varianz die relative Gewichtung zwischen den Beobachtungen und dem Systemverhalten bei der Bestimmung des ausgeglichenen Zustandsvektors. Aus diesem Grund ist die Größenordnung der additiven Störbeschleunigung mit Bedacht zu wählen.

3.4.3 Erweiterung des Zustandsvektors

Der in Kapitel 3.4.1 verwendete Zustandsvektor ist zur Vereinfachung auf die Beschreibung eines einzelnen Punktes ausgerichtet. Prinzipiell ist es jedoch problemlos möglich, eine beliebige Anzahl an Punkten - entsprechend einer größeren Anzahl GPS-Empfänger - in den Zustandsvektor $\boldsymbol{y}$ aufzunehmen.

Wird ein zweiter GPS-Empfänger zur redundanten Bestimmung der Fahrzeugposition verwendet, so können die Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen für die zweite Antennenposition mitgeschätzt werden. Die Integration eines weiteren Punktes in den Zustandsvektor kann auch nach einer beliebigen Anzahl an bereits prozessierten Epochen geschehen, wenn die Beobachtungszeiträume beider Empfänger nicht vollständig identisch sind. Der Zustandsvektor lautet für den Fall einer endlichen Anzahl i an Einzelpunkten:

$$\boldsymbol{y}' = \begin{bmatrix} \boldsymbol{y}_1 \\ \boldsymbol{y}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{y}_i \end{bmatrix}, \; mit \; \boldsymbol{y}_i = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \dot{\boldsymbol{x}} \\ \ddot{\boldsymbol{x}} \end{bmatrix}_i \tag{3.40}$$

Der Vorteil einer solchen Modellierung besteht darin, dass nicht nur absolute Beobachtungen zur Aufdatierung des Zustandsvektors in Gleichung (3.33), sondern auch relative Informationen wie der zeitinvariante Abstand der Antennenphasenzentren als Zusatzinformation in die Ausgleichung miteinbezogen werden können.

Eine gleichzeitige Schätzung beider Einzelpositionen in einem gemeinsamen Zustandsvektor, wie sie in diesem System möglich ist, bringt insbesondere dann Vorteile, wenn die Messungen der einzelnen Empfänger mit unterschiedlichen Unsicherheiten behaftet sind.

3.5 Glättungsalgorithmen

3.5.1 Klassifizierung der Algorithmen

Um die Unsicherheit der Bestimmung eines Systemzustands $\boldsymbol{y}$ zum Zeitpunkt k zu verringern, werden häufig Glättungsoperatoren - auch Smoother genannt - zur Schätzung verwendet. Zur Glättung werden hierbei sowohl Messwerte vor $(k-i)$ als auch nach $(k+i)$ dem Zeitpunkt k verwendet, wodurch diese Verfahren auf den Einsatz im Postprocessing beschränkt sind. Nach Grewal und Andrews (2001) lassen sich prinzipiell drei verschiedene Glättungsoperatoren unterschieden:

1. „Fixed-Interval-Smoother“ wie der Rauch-Tung-Striebel (RTS) Glättungsoperator ziehen zur Berechnung des geglätteten Schätzwertes alle verfügbaren Zustände innerhalb eines vordefinierten Intervalls heran. Diese Form des Glättungsoperators ist geeignet, den optimalen Schätzwert des Zustandsvektors über das gesamte Intervall zu ermitteln.

2. Die sogenannten „Fixed-Point-Smoother“ werden verwendet, um genau einen Schätzwert in der Vergangenheit für den Systemzustand innerhalb des vorliegenden Intervalls zu bestimmen.

3. „Fixed-Lag-Smoother“ führen eine Glättung von Messwerten in einem festen Intervall durch, welches dem aktuellen Zustand direkt nachfolgt. Diese Operatoren besitzen durch die Art der Glättung einen konstanten Versatz zum momentanen Messwert, was jedoch zu erhöhten Genauigkeiten für den geglätteten Zustandsvektor führt.

3.5.2 Vorwärts-Rückwärts-Kalman-Filter

Die Glättung einer Messwertreihe durch den sequentiellen Einsatz eines Kalman-Filters im Hin- und Rückweg, der sogenannten Vorwärts-Rückwärts-Filterung, stellt die konkrete Realisierung eines Fixed-Point-Smoother-Ansatzes dar. Hierbei wird zunächst die aus Kapitel 3.4.1 bekannte Filterung der Daten im zu glättenden Intervall $t_0 \dots t_i$ vorgenommen, aus der sich der ausgeglichene Zustandsvektor $\hat{\boldsymbol{y}}_i$ und seine VKM $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{y}\hat{y},i}$ ergeben.

Im Gegensatz zur Filterung im Hinweg werden $\hat{\boldsymbol{y}}_i$ und $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{y}\hat{y},i}$ als Startwerte für die Filterung im Rückweg verwendet. Hierdurch kann die Information über das Systemverhalten genutzt werden, die bereits im Hinweg ermittelt wurde.

Nachdem beide Filterrichtungen durchlaufen wurden, sind die Zustandsvektoren und ihre Varianzen auf geeignete Weise zu kombinieren. Hierbei werden die vorwärts $\hat{\boldsymbol{y}}_{V,k}$ und rückwärts gefilterten Werte $\hat{\boldsymbol{y}}_{R,k}$ zu einem geglätteten Systemzustand $\hat{\boldsymbol{y}}_{VR,k}$ durch Bildung der gewichteten Linearkombination auf der Grundlage der entsprechenden VKM verbunden. Der geglättete Schätzwert für den Systemzustand und seine VKM ergeben sich in diskreter Schreibweise somit durch:

$$\boldsymbol{Q}_{VR,\hat{x}\hat{y},y} = (\boldsymbol{Q}^{-1}_{V,\hat{y}\hat{y},k} + \boldsymbol{Q}^{-1}_{R,\hat{y}\hat{y},k})^{-1} \tag{3.41}$$

$$\hat{\boldsymbol{y}}_{VR,k} = \boldsymbol{Q}_{VR,\hat{y}\hat{y},k}(\boldsymbol{Q}^{-1}_{V,\hat{y}\hat{y},k} \cdot \hat{\boldsymbol{y}}_{V,k} + \boldsymbol{Q}^{-1}_{R,\hat{y}\hat{y},k} \cdot \hat{\boldsymbol{y}}_{R,k}) \tag{3.42}$$

Eine ausführliche statistische Begründung dieses glättenden Zwei-Filter-Ansatzes kann der Literatur entnommen werden (Schrick, 1977, Seite 70 ff.).

3.5.3 Rauch-Tung-Striebel-Algorithmus

Der Rauch-Tung-Striebel Algorithmus kann nach SCHRICK (1977) mit Hilfe einfacher Umformungen aus der Zwei-Filter-Form (Kapitel 3.5.2) des Kalman-Filters hergeleitet werden. Zur Glättung einer Messwertreihe wird diese zunächst durch einen gewöhnlichen Kalman-Filter im Vorwärtsgang gefiltert, bevor die geglätteten Schätzwerte - ähnlich wie beim Vorwärts-Rückwärts-Filter - in einem zweiten Durchgang rückwärts in der Zeit bestimmt werden.

Zur Berechnung des geglätteten Schätzwertes im Intervall $0 < k \leq N$ müssen zunächst für jede Epoche der ausgeglichene und prädizierte Schätzwert für den Zustandsvektor aus der Vorwärts-Kalman-Filterung im Hinweg

$$\begin{matrix} \hat{\boldsymbol{y}}_k \\ \bar{\boldsymbol{y}}_k \end{matrix} \qquad \text{mit } k = 1..N$$

sowie die dazugehörigen Kofaktormatrizen

$$\begin{matrix} \boldsymbol{Q}_{\hat{y}\hat{y},k} \\ \boldsymbol{Q}_{\bar{y}\bar{y},k} \end{matrix} \qquad \text{mit } k = 1..N$$

bekannt sein. Anschließend werden alle Epochen der Messwertreihe rückwärts von N bis 0 durchlaufen. Die Bestimmung des geglätteten Schätzwertes für den Zustand $\hat{\boldsymbol{y}}_{RTS,k}$ erfolgt hierbei mit Hilfe der rekursiven Gleichungen auf Grundlage der im Kalman-Filter vorwärts gefilterten Zustandsvektoren $\hat{\boldsymbol{y}}_{Kal,k}$

$$\hat{\boldsymbol{y}}_{RTS,k} = \hat{\boldsymbol{y}}_{Kal,k} + \boldsymbol{A}_k \cdot (\hat{\boldsymbol{y}}_{RTS,k+1} - \bar{\boldsymbol{y}}_{Kal,k+1}) \tag{3.43}$$

mit

$$\boldsymbol{A}_k = \boldsymbol{Q}_{Kal,\hat{y}\hat{y},k} \cdot \boldsymbol{T}_k^T \cdot \boldsymbol{Q}_{Kal,\bar{y}\bar{y},k+1}^{-1}. \tag{3.44}$$

Hierbei ist zu beachten, dass die zeitliche Indizierung der Variablen für die Rückwärts-Filterung umgekehrt zu lesen ist. Auf die Epoche $k+1$ folgt in diesem Fall die Epoche k. Auch die VKM des geglätteten Schätzwertes ergibt sich rekursiv aus dem zweiten Filterdurchgang:

$$\boldsymbol{Q}_{RTS,\hat{y}\hat{y},k} = \boldsymbol{Q}_{Kal,\hat{y}\hat{y},k} + \boldsymbol{A}_k \cdot (\boldsymbol{Q}_{RTS,\hat{y}\hat{y},k+1} - \boldsymbol{Q}_{Kal,\bar{y}\bar{y},k+1}) \cdot \boldsymbol{A}_k^T. \tag{3.45}$$

Als Startwerte zur Initialisierung des Glättungsfilters für den Zeitpunkt $k = N$ dienen wie bei der Vorwärts-Rückwärts-Filterung der ausgeglichene Zustandsvektor aus der Vorwärts-Filterung $\hat{\boldsymbol{y}}_{Kal,N}$ und seine VKM $\boldsymbol{Q}_{Kal,\hat{y}\hat{y},k}$.

$$\boldsymbol{y}_0 = \hat{\boldsymbol{y}}_{Kal,N} \tag{3.46}$$

$$\boldsymbol{Q}_{yy,0} = \boldsymbol{Q}_{Kal,\hat{y}\hat{y},N}. \tag{3.47}$$

Laut SCHRICK (1977) ist die Varianz des geschätzten Systemzustandes $\hat{\boldsymbol{y}}_k$ auf Grundlage der vorliegenden Messwerte durch die Glättung einer Messwertreihe mit Hilfe des RTS-Filters bereits minimal. Hieraus folgt, dass eine nochmalige Filterung keinen Genauigkeitsgewinn mehr zur Folge haben kann. Für die ausführliche Herleitung der mathematischen und statistischen Zusammenhänge sei an dieser Stelle auf die weiterführende Fachliteratur hingewiesen (Schrick, 1977, Seite 70 ff.), (Haykin, 2001, Seite 11 ff.).

Wie in Kapitel 3.7.3 gezeigt wird, lässt sich aus den geglätteten Schätzwerten des Zustandsvektors der horizontale Raumwinkel ableiten, so dass für dessen Unsicherheitsbestimmung die Berechnung der VKM notwendig ist. Kapitel 9.4.1 zeigt die erzielbaren Genauigkeiten eines abgeleiteten Horizontalwinkels anhand empirischer Messungen.

3.6 Positionsbestimmung mit GPS

3.6.1 Anforderungen an die Positionsbestimmung

Wie bereits im Rahmen der Einleitung diskutiert, ist eine Positionsbestimmung der mobilen Plattform in einem übergeordneten Koordinatensystem zwingende Voraussetzung für die Operabilität des gesamten

Systems. Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen, die eine Nutzung von zusätzlichen externen Sensoren außerhalb des Fahrzeuges weitgehend ausschließen, ist die Verwendung terrestrischer Messverfahren nicht zuletzt aufgrund des großen Aktionsradius des Messsystems ausgeschlossen.

Aus diesem Grund erwächst die Positionsbestimmung mit Hilfe eines globalen satellitengestützten Messverfahrens - ausgehend von der englischen Bezeichnung als GNSS (Global Navigation Satellite System) bezeichnet - zu einer der zentralen Messaufgaben. Hierzu stehen aktuell das US-amerikanische GPS System und sein russisches Pendant GLONASS zur Verfügung, für deren kombinierte Nutzung eine Reihe von Empfängern am Markt verfügbar sind. Neben diesen beiden Systemen befindet sich zum Zeitpunkt der Entwicklung dieses Systems das europäische Konkurrenzsystem GALILEO noch in der Aufbauphase und soll nach derzeitigen Planungen ab dem Jahr 2012 operabel sein.

Die beiden wesentlichen einschränkenden Faktoren der satellitengestützten Positionierung sind zum einen die ausreichende und gleichzeitige Verfügbarkeit von Satellitensignalen und zum anderen die geometrische Verteilung der Satelliten im Raum. Die nicht vorhandene Verfügbarkeit verhindert häufig den Einsatz von GPS in engen Straßenschluchten. Diese Einschränkung wird jedoch durch die künftig mögliche kombinierte Nutzung von GPS, GLONASS und GALILEO deutlich verbessert werden, wohingegen die geometrischen Bedingungen aufgrund von Abschattungen nicht verbessert werden können. Tabelle 3.4 zeigt die aktuell verfügbaren und in der Entwicklung befindlichen GNSS, weitere Parameter und Leistungsdaten können der Literatur entnommen werden (Seeber, 2003), (Hofmann-Wellenhof u. a., 2001) und (Leick, 2004).

System	**GPS**	**GLONASS**	**GALILEO**
Anzahl der Satelliten	30+2[1]	8+3[2]	30
Aktueller Status	In Betrieb	In Betrieb[3]	ab 2012

1: In Warteposition 2: Kurz vor Inbetriebnahme

3: Nutzbarkeit eingeschränkt

Tabelle 3.4: Übersicht der GNSS-Systeme (Stand März 2007)

Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit der Systeme GLONASS und GALILEO soll für die Positionsbestimmung im Rahmen dieser Arbeit das GPS-System genutzt werden. Der große Vorteil einer GNSS-gestützten Positionsbestimmung sind ihr standardisierter hochgenauer globaler Referenzrahmen sowie die Möglichkeit einer im Rahmen der geforderten Messgenauigkeit driftfreien Positionsbestimmung.

Bedingt durch verschiedene physikalische Einflüsse hinsichtlich der Signalausbreitung ist die Genauigkeit der einfachen satellitengestützten Positionsbestimmung für die vorliegende Aufgabe nicht ausreichend. Zur Verringerung der systematischen Einflüsse und einer damit verbundenen deutlichen Genauigkeitssteigerung wurden eine Reihe von Erweiterungen des Messverfahrens und Verfeinerungen der Auswertemethodik entwickelt. Hierzu zählen insbesondere die differentielle Auswertung (Kapitel 3.6.2) und die darauf aufsetzende Vernetzung von Referenzstationen (Kapitel 3.6.3), durch deren Einsatz Genauigkeiten der Einzelpunktbestimmung von besser als 0.01 m möglich sind.

Im Hinblick auf eine spätere Erweiterung des Systems besteht bei der Verwendung von GNSS auch für hohe Genauigkeitsanforderungen die Möglichkeit einer Positionierung in Echtzeit (Willgalis, 2005).

3.6.2 DGPS und SAPOS

Für eine hochgenaue Positionsbestimmung mit satellitengestützten Messverfahren ist die gleichzeitige Beobachtung von Trägerphasenmessungen durch mindestens zwei Empfänger notwendig. Häufig wird hierbei zwischen relativer und differentieller Positionsbestimmung unterschieden, die sich jedoch im Wesentlichen durch den Zeitpunkt der Auswertung unterscheiden. Bei relativer Positionierung werden die von zwei Empfängern durchgeführten Beobachtungen im Postprocessing auf einem gemeinsamen Rechner ausgewertet, bei der differentiellen Positionierung werden die Beobachtungen des Referenzempfängers direkt an den Rover übertragen, um dessen Position in Echtzeit bestimmen zu können (Willgalis, 2005).

Bei einer Auswertung im Postprocessing werden Code- und Phasenmessungen einer koordinatenmäßig bekannten Referenzstation zum Auswerterechner transferiert. Als Alternative für die Verwendung einer eigenen Referenzstation können die entsprechenden Daten auch vom Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) bereitgestellt werden, der ein bundesweites Referenzstationsnetz

betreibt. Hieraus können zusammen mit den Rohdaten des Rovers hochgenaue Koordinatendifferenzen zwischen SAPOS-Referenz und Rover berechnet werden. Durch Addition der Differenzen zu den bekannten Koordinaten der Referenzstation erhält man die absoluten Positionen des Rovers (Abbildung 3.10).

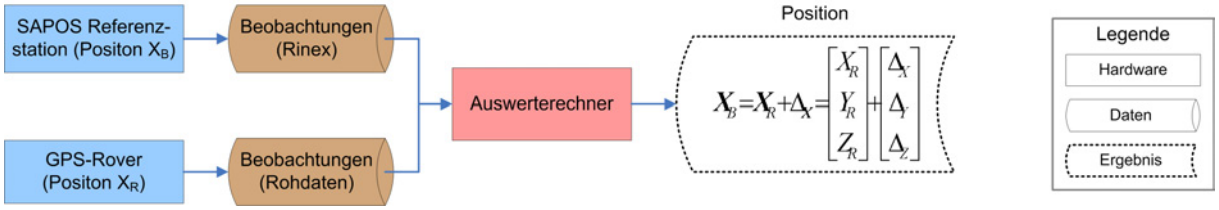


Abbildung 3.10: Prinzip der relativen GPS Bestimmung

Grundlegend muss bei einer Auswertung von GPS-Messungen, die mit mehreren Empfängern durchgeführt wurden, zwischen der differenzierten und der undifferenzierten Phasenauswertung unterschieden werden. Die unter anderem von Wübbena (1991) vorgestellte undifferenzierte Phasenauswertung verfolgt den Weg, die Zustandsparameter der Beobachtungsgleichung von Phasenmessungen explizit mitzuschätzen und zu modellieren, weshalb dieser Ansatz auch als Parameterschätzung bezeichnet wird. Im Gegensatz dazu werden beim Ansatz zur Parametereliminination durch Differenzbildung ein-, oder mehrfache Differenzen der Phasenbeobachtungen abgeleitet, um die durch Empfänger und Raumsegment bedingten systematischen Abweichungen zu beseitigen und eine zuverlässige Lösung von Mehrdeutigkeiten der Phasenbeobachtungen zu ermöglichen.

Unsicherheitsanteil	**Unsicherheit Absolutmessung**	**Unsicherheit differentielle Basislinie**
Entfernungsabhängig:		
Satellitenuhr	5 - 100 m	0 ppm
Satellitenorbit	5 - 50 m	0.2 - 2 ppm
Troposphäre	0.01 - 0.5 m	0.1 - 3 ppm
Ionosphäre	0.5 - 100 m	0.1 - 50 ppm
Stationsabhängig:		
Mehrwegeausbreitung	mm - cm	mm - cm
Antennenphasenzentrum	mm - cm	mm - cm
Messrauschen	$\leq$3 mm	$\leq$4 mm

Tabelle 3.5: Unsicherheitseinflüsse der GPS-Positionierung (Willgalis, 2005)

Werden die systematischen Abweichungen konsequent eliminiert, so können die differentiellen Koordinatenunterschiede zwischen zwei Empfängern mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Die verbleibenden Unsicherheiten bei der Verwendung absoluter und differentieller GPS-Beobachtungen bewegen sich in aller Regel innerhalb der in Tabelle 3.5 genannten Grenzen. Neben den entfernungsabhängigen Einflüssen existieren auch stationsabhängige Einflüsse wie eine Mehrwegeausbreitung und die Variation des Antennenphasenzentrums. Diese Effekte sind auch in kinematischen Anwendungen vorhanden, variieren aufgrund der Bewegung der Antenne jedoch im Laufe der Messung.

Da das zu entwickelnde System ohne eigenen Referenzempfänger auskommen soll, erscheint die Nutzung von Referenzstationsnetzen wie SAPOS als ideale Lösung. Der von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder (AdV) eingerichtete Korrekturdatendienst SAPOS, bietet Korrekturdaten verschiedener Genauigkeitsniveaus im RINEX-Format (**R**eceiver **In**dependent **Ex**change Format), die sowohl für Echtzeit- als auch für Postprocessing Anwendungen genutzt werden können. Tabelle 3.6 liefert einen Überblick über die hochpräzisen SAPOS Dienste, die für den Echtzeit- und Postprocessingbetrieb des vorliegenden System in Frage kommen.

3.6.3 Vernetzung und virtuelle Referenzstationen

Wie aus Tabelle 3.5 zu ersehen ist, sind die Genauigkeiten einer differentiellen GPS-Lösung zu großen Teilen entfernungsabhängig. Das Netz der aktuell installierten SAPOS Referenzstationen weist überwie-

Verfahren	Service	Genauigkeit	Taktrate	Übertragungsmedium
Echtzeit	HEPS	1-2 cm Lage	1 s	GSM, Internet
		2-6 cm Höhe	1 s	
Postprocessing	GPPS	$\leq$1 cm	$<$ 1 s	Internet, email

Tabelle 3.6: Übersicht der SAPOS Dienste (AdV, 2004)

gend eine Maschenweite von mehr als zehn Kilometern auf. Zur weiteren Steigerung der Genauigkeit innerhalb des SAPOS Netzes haben sich zwei Verfahren durchgesetzt:

1. Berechnung von Flächenkorrekturparametern (FKP)
2. Erzeugung einer virtuellen Referenzstation (VRS)

Die Berechnung von Flächenkorrekturparametern ist vornehmlich für Echtzeitanwendungen konzipiert und setzt auf der Grundlage der in Kapitel 3.6.2 beschriebenen undifferenzierten Auswertung von Phasenmessungen auf (Goad, 1985), (Wübbena, 1991), (Seeber, 2003).

Das Verfahren zur Erzeugung einer VRS innerhalb einer Dreiecksmasche des SAPOS Referenzstationsnetzes (Wanninger, 2000b) ist primär auf Postprocessing-Anwendungen ausgelegt. Bei diesem Verfahren werden virtuelle GPS-Beobachtungen an einer beliebigen Position innerhalb des SAPOS Netzes in Form einer synthetischen Referenzstation berechnet. Der Vorteil diese Lösung besteht darin, dass diese Referenzstationsdaten analog zu den Beobachtungen einer eigenen Referenzstation mit Hilfe der gängigen Auswerteprogramme genutzt werden können (AdV, 2004).

Aus Gründen der Vereinfachung der GPS-Auswertung wurde das Verfahren der VRS für die Positionsbestimmung des Messsystems verwendet, da eine Echtzeitfähigkeit zum aktuellen Zeitpunkt nicht gefordert ist.

3.6.4 Interpolation von GPS-Beobachtungen

Für eine Auswertung der im Rahmen dieser Systementwicklung durchgeführten DGPS Beobachtungen sind wie bereits diskutiert Referenzstationsdaten notwendig. Hierfür sollen die über den Rinex Datenservice des SAPOS Netzes zur Verfügung stehenden Daten einer virtuellen Referenzstation (Kapitel 3.6.3) genutzt werden, die mit originären Taktraten von $1 - 60$ s erhältlich sind (AdV, 2004).

Da die auf dem Fahrzeug eingesetzten GPS Empfänger eine Positionsbestimmung stets mit maximaler Datenrate von 10 Hz durchführen, besteht eine Diskrepanz zwischen den Taktraten von Referenzstation und Rover. Gängige Auswerteprogramme für GPS Beobachtungen wie die verwendete Software Trimble Total Control führen eine kinematische Einzelpunktbestimmung mit der jeweils niedrigeren Frequenz von Referenzstation und Rover durch, so dass die eigentlich höhere Datenrate der Rover ohne Interpolation ungenutzt bleibt.

Soll eine Interpolation der Referenzstationsdaten durchgeführt werden, so ist zunächst die Frage zu klären, ob bei einer DGPS-Positionierung signifikante systematischen Effekte mit einer Periodendauer im Bereich der Datenrate der Referenzstation verbleiben.

Aus den von Wanninger (2000a) durchgeführten Untersuchungen wird deutlich, dass eine Interpolation von GPS-Beobachtungen von 0.1 Hz auf 1 Hz ohne signifikanten Genauigkeitsverlust möglich ist. Hierbei werden die Pseudoranges um die geometrische Entfernung zwischen Empfänger und Satellit nach Anbringung der Uhrkorrektionen reduziert und als Grundlage der Interpolation verwendet. Als Interpolationsfunktion werden sowohl lineare als auch polynomiale Ansätze verwendet. Eine konkrete Umsetzung für die polynomiale Interpolation von GPS Beobachtungen ist in Horemuz und Andersson (2006) zu finden.

Auch (Mader und Morrison, 2002) untersuchen die Interpolation mit Hilfe polynomialer und linearer Ansätze für rohe und reduzierte Phasenmessungen. Sie kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass eine Interpolation von 15 s auf 1 s Epochenabstand keine Verschlechterung der Genauigkeit für kinematische Anwendungen mit sich bringt. Darüber hinaus ergeben die Untersuchungen, dass auch eine Extrapolation von GPS Referenzstationsdaten für Echtzeitanwendungen bei geringen Epochenabständen von bis zu 10 s möglich sind. Es wird somit davon ausgegangen, dass die Interpolation von 1 Hz auf 10 Hz im Rahmen der definierten Genauigkeitsanforderungen unter Verwendung eines linearen Ansatzes möglich ist.

Für die Interpolation der Referenzstationsdaten von 1 Hz auf 10 Hz wurde in diesem Projekt ein linearer Ansatz zwischen zwei aufeinander folgenden Epochen gewählt, der teilweise die von Borre (2001) sowie Borre (2003) veröffentlichten Algorithmen zur Verarbeitung von GPS-Beobachtungsdaten im RINEX-Format verwendet.

3.7 GPS-gestützte Bestimmung von Gier-, Nick- und Rollwinkel

3.7.1 Vor- und Nachteile der Nutzung von GPS

Der erhebliche Vorteil der Azimutbestimmung mit Hilfe von GPS ist die weitgehende Unabhängigkeit von Drifterscheinungen, die bei inertialen Verfahren zu erhöhten Schwierigkeiten hinsichtlich der Langzeitstabilität führen können.

Das eigentliche Ziel der Bestimmung von Positions- und Orientierungsparametern ist nicht auf diejenigen Zeitpunkte gerichtet, zu denen GPS-Beobachtungen vorliegen, sondern zu denen Scanprofile erfasst wurden. Mit Hilfe von dreidimensionalen Punktpositionen sowie drei Raumwinkeln sollen die zweidimensionalen Scanprofile mit Translations- und Rotationswerten versehen werden, so dass sie in den dreidimensionalen Objektraum überführt werden können.

In den nachfolgenden Ausführungen soll der in Kapitel 3.1.4 definierte Begriff des Azimutes anstelle des Gierwinkels für die Beschreibung der horizontalen Orientierung der Fahrzeugachse in der Gauß-Krüger-Ebene verwendet werden, um den Bezug zur Hoch-Achse des Gauß-Krüger-Systems zu verdeutlichen.

3.7.2 Differentielle GPS-Phasenmessungen

Die Bestimmung der räumlichen Orientierung von Plattformen durch GPS-Beobachtungen wird seit langer Zeit wissenschaftlich verfolgt. So wird von Evans (1986) ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem die Phasenänderungen der Signale mehrerer GPS-Satelliten zur Azimutbestimmung verwendet werden können. Die Ableitung von Gier-, Nick- und Rollwinkel erfolgt hierbei aus den Phasenmessungen einer kreisförmig rotierenden Antenne.

Kruczynski u. a. (1989) führen ausgiebige Tests zur Bestimmung des Kurses der USS Yorktown durch. Die drei Raumwinkel werden hierbei ebenfalls mit einem einzelnen Empfänger bestimmt, der jedoch ein aus drei Antennen bestehendes Array zur Signalerfassung nutzt. Die Antennen bilden hierbei die Eckpunkt eines rechwinkligen Dreiecks mit Kathetenlängen von 40 cm und 60 cm. Auf der Grundlage der gleichzeitig beobachteten differentiellen Phasenmessungen aller drei Antennen werden die unbekannten Parameter bestimmt. Die empirisch bestimmte Standardabweichung für den über die 60 cm lange Basis bestimmten Gierwinkel wird mit $\sigma_{Az} \leq 2^\circ$ angegeben, bei einer ebenfalls getesteten Basislänge von 25 m mit $\sigma_{Az} \leq 0.1^\circ$. Der Nickwinkel wird bei 60 cm Basislänge mit einer Unsicherheit von $s_{Nick} = 5.5^\circ$ angegeben, der Rollwinkel kann aufgrund der kürzeren Basis von 40 cm nur mit $s_{Roll} = 7^\circ$ bestimmt werden.

Cohen (1992) stellt ein GPS-basiertes System zur absoluten Bestimmung von Gier-, Nick- und Rollwinkel eines Fahrzeuges mit Hilfe eines sogenannten Antennen-Multiplexers vor. Hierzu werden die von n Antennen (hier mit $n = 4$) gleichzeitig erfassten Phasenmessungen über einen Multiplexer auf den Antenneneingang eines einzelnen GPS-Empfängers geschaltet und dort verarbeitet. Abhängig von der Anzahl der verwendeten Antennen reduziert sich somit auch die Anzahl der nutzbaren Kanäle um den Faktor n. Darüber hinaus ist eine Modifikation der Empfängersoftware zur Verarbeitung der durch das Multiplexing kombinierten Phasenmessungen notwendig. Vorteilhaft wirkt sich hierbei aus, dass nur ein Empfänger verwendet wird, wodurch verschiedene Quellen der Messunsicherheit eliminiert werden. Hauptanwendungsgebiet für dieses System ist weniger die terrestrische Navigation, sondern vielmehr die Bestimmung der aktuellen Raumwinkel von Luftfahrzeugen.

Für eine empirische Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten wurden umfangreiche Testflüge mit einem Array aus 4 GPS Antennen, die auf einem Kleinflugzeug befestigt waren, durchgeführt. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass Genauigkeiten der Azimutbestimmung von $\sigma_{Az} \leq 0.1^\circ$ bei Datenraten von 10 Hz problemlos möglich sind.

Wie oben erwähnt, hängt die Genauigkeit der in diesem Kapitel diskutierten Verfahren stark von der Verfügbarkeit und Geometrie der Satellitenkonstellation ab. Der nahe liegende Ansatz, neben GPS auch das zweite GNSS System GLONASS zur Erhöhung der Redundanz und zur Verbesserung der geometrischen Konfiguration einzusetzen, wird von Keong und Lachapelle (2000) verfolgt.

Abweichend zu der Vorgehensweise von Kruczynski u. a. (1989) und Cohen (1992) erfolgt die Auswertung der Phasenmessungen jeder Antenne in diesem Fall mit zwei getrennten Empfängern. Nachteilig wirkt sich hierbei jedoch aus, dass Glonass im Gegensatz zu GPS das sogenannte Frequency Division Multiple Access (FDMA) Verfahren zur signaltechnischen Unterscheidung einzelner Satelliten einsetzt. Hierdurch wird der Einsatz bekannter Verfahren wie der Bildung von Doppeldifferenzen zur Elimination von Empfängeruhrfehlern deutlich erschwert, so dass in diesem Fall lediglich Einfachdifferenzen der Trägerphase verwendet werden. Um diesen Nachteil auszugleichen, wird unter anderem vorgeschlagen, einen externen Oszillator zur Synchronisation der beiden Empfängeruhren zu nutzen. In diesem Ansatz werden darüber hinaus sehr ausführliche Untersuchungen zur Signalqualität der einzelnen Satellitensignale und des Einflusses von Multipath durchgeführt. Unter Verwendung von Einfachdifferenzen konnte bei einer Basislinie von 1 m im statischen Anwendungsfall (20 min Beobachtungszeit) eine Unsicherheit der Azimutbestimmung von $\sigma_{Az} = 0.01°$ erreicht werden, bei kinematischem Einsatz auf einem Fahrzeug und einem Antennenabstand von 1.1 m immerhin 0.4°.

Aus den vorangehenden Ausführungen wird klar, dass die Bestimmung von Gier-, Nick- und Rollwinkel aus GPS-Beobachtungen eine adäquate Methode ist. Hierbei stellen jedoch die Basislänge als geometrische und Multipath Effekte als signaltechnische Größen die wesentlichen genauigkeitsbeeinflussenden Komponenten dar. Insgesamt können mehrere GPS-Empfänger zu einer erhöhten Redundanz und somit zu besseren Genauigkeiten beitragen können. Ausgehend von einer angenommenen Unsicherheit des Azimutes von $\sigma_{Az} = 0.1°$ ergibt sich für eine Messentfernung von 20 m eine Unsicherheit der Punktbestimmung in tangentialer Richtung von $s_{xy} = 3.5$ cm, was für die vorliegende Aufgabenstellung ausreichend ist.

Die Bestimmung von Raumwinkeln durch differentielle Phasenmessungen kann unabhängig von inertialen Sensoren bei vergleichsweise hohen Genauigkeiten und einer weitgehenden Unabhängigkeit von Drifterscheinungen geschehen. Als Beispiel der Realisierung in einem kommerziellen Produkt kann das GPS Azimuth Heading Measurement System (GAMS) von Applanix genannt werden.

Einschränkend ist jedoch zu sagen, dass das vorgestellte Verfahren technisch vergleichsweise aufwendig ist und aufgrund der notwendigen Signaltrennung nicht mit Standardsensoren realisiert werden kann. Aus diesen Gründen kommt ein Einsatz dieses Verfahrens im vorliegenden System nicht in Betracht.

3.7.3 Das Kalman-Filter

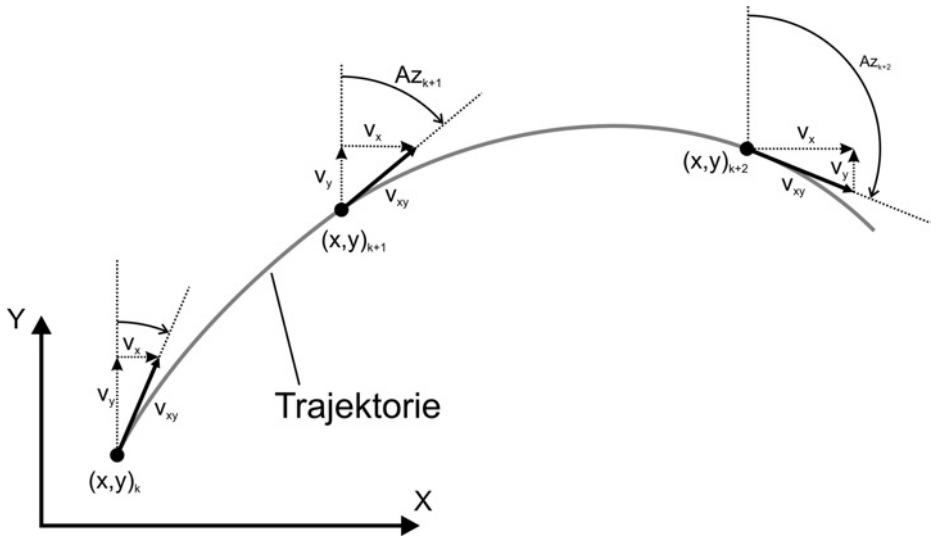


Abbildung 3.11: Indirekte Azimutbestimmung aus Kalman-Filterdaten

Die Ableitung von Gier- und Nickwinkel aus den Ergebnissen der Kalman-Filterung ist ein weiteres indirektes Verfahren zu Bestimmung der Fahrzeugorientierung. Wie auch bei der in Kapitel 3.7.2 vorgestellten Methode werden hierbei ausschließlich mathematische Zusammenhänge genutzt, so dass als Eingangsdaten lediglich die kinematisch prozessierten Einzelpunktpositionen benötigt werden. Dies hat den Vorteil, dass die Orientierungselemente aus den Messungen eines oder mehrerer unabhängiger GPS-Empfänger bestimmt werden können.

Wie in Kapitel 3.4.1 gezeigt wurde, kann durch Einsatz eines kinematischen Kalman-Filters bei Annahme einer gleichförmig beschleunigten Bewegung für jede Epoche t_k der Zustandsvektor

$$\hat{\mathbf{y}}_k = (x, y, z, v_x, v_y, v_z, a_x, a_y, a_z)_k^T \tag{3.48}$$

mit seiner VKM $\mathbf{\Sigma}_{\hat{y}\hat{y},k}$ unter Zuhilfenahme von Messungen bestimmt werden. Der Vektor $\hat{\boldsymbol{y}}_k$ enthält nicht nur die reinen Raumkoordinaten des Systemzustands, sondern aufgrund des kinematischen Ansatzes auch seine aktuellen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in Richtung der Koordinatenachsen. Abbildung 3.11 zeigt die Koordinaten des Systems sowie seine Geschwindigkeitsvektoren in der ebenen Darstellung. Die Varianz der Beobachtungen wurde aus Gründen der Vereinfachung mit Null angenommen.

Über die einfache Beziehung

$$\psi_k = \arctan\left(\frac{v_x}{v_y}\right)_k \tag{3.49}$$

können unter Berücksichtigung der Vorzeichen von v_x und v_y für jeden Systemzustand $\hat{\boldsymbol{y}}_k$ das Azimut ψ_k und seine Unsicherheit

$$\mathbf{\Sigma}_{\psi\psi,k} = \boldsymbol{F} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{v_x}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{v_y}^2 \end{bmatrix}_k \cdot \boldsymbol{F}^T \tag{3.50}$$

mit

$$\boldsymbol{F} = \left[\frac{1}{1+(v_x/v_y)^2} \cdot \frac{1}{v_y} \quad \frac{1}{1+(v_x/v_y)^2} \cdot \frac{-v_x}{2*v_y^2}\right]_k \tag{3.51}$$

abgeleitet werden. Bezeichnet man die Resultierende der Geschwindigkeitsvektoren in der X-Y-Ebene mit

$$v_{R,k} = \sqrt{v_{x,k}^2 + v_{y,k}^2}, \tag{3.52}$$

so kann mit Hilfe von $v_{z,k}$ auch der Nickwinkel analog zu den Gleichungen (3.49) und (3.50) bestimmt werden.

Wesentlicher Vorteil der Verwendung eines Kalman-Filters ist die Forderung nach gleichzeitiger Ermittlung der Raumwinkel für diejenigen Zeitpunkte und somit Epochen, zu denen ein Scanprofil erfasst wurde. Über die Prädiktionsgleichung (3.24) können die Geschwindigkeitsvektoren sehr einfach für Zwischenepochen bestimmt werden, in denen keine GPS-Beobachtungen erfasst wurden.

Bedingt durch das Wesen des verwendeten Filteralgorithmus besitzt das aus GPS-Einzelpositionen abgeleitete Azimut insbesondere in Bereichen mit hoher Fahrdynamik eine vergrößerte Unsicherheit. Diese tritt speziell bei schnellen Richtungswechseln oder Kurven mit sehr kleinem Radius auf, da die zur Glättung der Trajektorie notwendige Trägheit des Filters hohe Drehraten des azimutalen Winkels verhindert. Ein Vergleich zwischen den Messungen eines Inertialmesssystems und Azimutwerten, die aus dem durch das Rauch-Tung-Striebel-Filter geglätteten Zustandsvektor abgeleitet wurden, ist in Kapitel 9.4.1 dargestellt.

3.7.4 Relatives DGPS

Wird die Positionsbestimmung einer bewegten Plattform mit zwei oder mehreren GPS Empfängern vorgenommen, so kann auch die relative Position der einzelnen Empfänger untereinander zur Azimutbestimmung genutzt werden (Willgalis, 2005). In diesem Fall kann von einem relativen DGPS-Verfahren gesprochen werden, da nicht die feste Referenzstation zur Bestimmung einer absoluten Roverposition verwendet wird, sondern eine ebenfalls bewegte Antenne als Referenz dient. Da hierbei nur die relativen Positionen zwischen beiden Antennen in Form von Koordinatendifferenzen im Rechts- und Hochwert ermittelt werden, vollzieht der Rover während der Bewegung praktisch eine Kreisbewegung um die ebenfalls bewegte Referenzantenne. Der Kreisradius r entspricht hierbei dem Abstand beider Antennen. Hieraus ergeben sich die in Abbildung 3.12 gezeigten relativen Positionen des bewegten Rovers zur bewegten Referenz.

Zur Azimutbestimmung wird die bewegte Referenz nun in jeder Epoche als Ausgangspunkt für die Azimutbestimmung zum bewegten Rover verwendet. Die aus den relativen DGPS Positionen abgeleiteten Azimute sind in Abbildung 3.13 zu sehen. Verglichen mit den über das Kalman-Filter berechneten

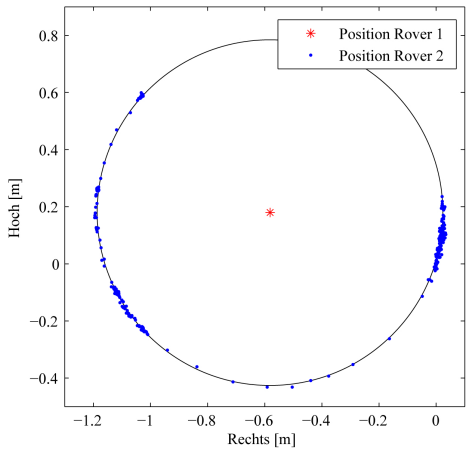


Abbildung 3.12: Roverpositionen aus relativer DGPS Auswertung

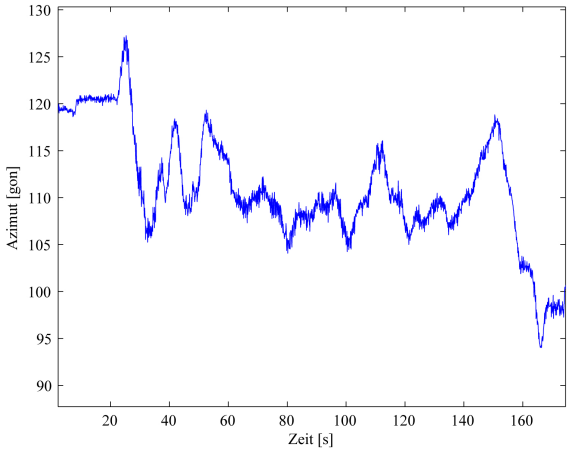


Abbildung 3.13: Azimut aus relativen DGPS-Messungen

Geschwindigkeitsvektoren besitzen diese Werte ein deutlich höheres Rauschniveau, was in erster Linie auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass es sich hierbei um ungefilterte GPS-Positionen handelt.

Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die im Rahmen einer Kalibrierung ermittelten Zusatzinformationen wie der räumliche Abstand beider Antennen (vergleiche auch Kapitel 3.4.3) im Gegensatz zur Azimutbestimmung aus Kalman-Filter-Daten nicht genutzt werden können. Zudem werden beide Antennen durch das Festhalten eines Empfängers für die Basislinienberechnung mit gleichem Unsicherheitsniveau in die Berechnung eingeführt.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Azimutbestimmung mit relativen DGPS-Beobachtungen im Vergleich zur Bestimmung im Kalman-Filter zwar keine rechnerische Korrektur eines Schleppkurveneffektes wie bei der Verwendung eines Empfängers erfordert, hierfür aber mit verdoppelten Hardwareanforderungen verbunden ist.

4 Terrestrische Laserscanner

4.1 Grundlagen terrestrischer Laserscanner

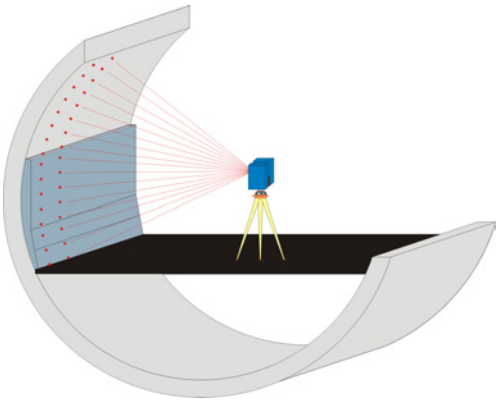


Abbildung 4.1: Rasterförmige Objektaufnahme

Terrestrische Laserscanner (TLS) gehören zu einer Klasse von Sensoren, die eine dreidimensionale Umgebungserfassung mit hoher Geschwindigkeit sowie hoher räumlicher Auflösung und Objektpunktgenauigkeiten von wenigen Millimetern durchführen können. Der Objektraum wird hierbei spalten- oder zeilenförmig abgetastet. Die so erfassten Punkte werden in ihrer Gesamtheit als Punktwolke bezeichnet. Unter der Voraussetzung, dass eine Drehung um die Stehachse des Scanners ausgeschaltet wird, kann prinzipiell jeder terrestrische Laserscanner auch als Profilscanner eingesetzt werden. Da diese Sensoren jedoch vornehmlich auf die dreidimensionale Objekterfassung ausgerichtet sind, wird eine solche Möglichkeit nur von wenigen Herstellern geboten (Kapitel 4.5).

Sensorisch betrachtet sind TLS polare Messsysteme mit lasergestützter Entfernungsmessung und ähneln somit reflektorlos messenden Tachymetern. Im Gegensatz zu diesen besitzen terrestrische Laserscanner jedoch kein Objektiv zur diskreten Anzielung von Punkten, sondern führen eine vollautomatische, reflektorlose und rasterförmige Erfassung der Umgebung durch (Abbildung 4.1).

Eine Klassifizierung wird häufig auf Grundlage der Methode zur Entfernungsmessung vorgenommen, wobei sich in der ingenieurgeodätischen Praxis die Verfahren der Impulslaufzeit- und Phasenvergleichsmessung durchgesetzt haben. Spezielle Scanner für den Nahbereich bis 2 m Entfernung verwenden darüber hinaus auch das Triangulationsprinzip zur Ermittlung der Objektentfernung. Die Parameter der Messgeschwindigkeit, der maximalen Objektentfernung und der Genauigkeit der Distanzmessung werden wesentlich durch physikalische Eigenschaften des verwendeten Prinzips der Entfernungsmessung bestimmt (Tabelle 4.1). So besitzen die nach dem Impulslaufzeitverfahren arbeitenden Scanner eine deutlich größere Reichweite, die nach dem Phasenvergleichsverfahren messenden Scanner besitzen demgegenüber Messgeschwindigkeiten, die um den Faktor 100 höher sind (Lemmens, 2004).

Messverfahren	**Phasenvergleich**	**Impulslaufzeit**
Distanzmessung		
Reichweite	< 80 m	< 1500 m
Genauigkeit	< 5 mm	> 5 mm
Hersteller	Zoller+Fröhlich,	Leica, Trimble
	Faro, Callidus	Riegl, Callidus

Tabelle 4.1: Klassifizierung der Distanzmessverfahren

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Laserscannern ist die Vergleichbarkeit der technischen Daten unabdingbare Voraussetzung. Nicht selten beziehen sich die angegebenen Werte jedoch auf unterschiedliche Definitionen einer Größe. So wird die Unsicherheit der Streckenmessung zum einen als Standardunsicherheit einer ausgeglichenen Ebene, zum anderen als die aus mehreren Einzelmessungen gemittelte Strecke oder in Form einer Unsicherheit der Einzelmessung angegeben. Für einen Vergleich der von verschiedenen Herstellern angegebenen Unsicherheit der Distanzmessung sei auf Staiger (2003) verwiesen. Ingensand (2006) schlägt zur besseren Vergleichbarkeit von Laserscannern die Angabe einheitlicher Spezifikationen für folgende Parameter des Messsystems vor:

- Auflösung in Scanpunkten pro Raumwinkel, der in der Einheit Steradiant (sr) angegeben werden kann
- Strahldivergenz mit Bezug zur Spotgröße in einer definierten Entfernung
- 3D-Genauigkeit in Form einer Messunsicherheit nach GUM (GUM, 1995)
- Scanrate in Einzelmessungen pro Sekunde

Eine solche Vereinheitlichung von Leistungsparametern ist insbesondere dann notwendig, wenn terrestrische Laserscanner in Systeme zu integrieren sind, für deren Messergebnisse Genauigkeitsinformationen auf der Grundlage statistischer Modelle abgeleitet werden sollen. Bislang sind für die konkrete Ermittlung quantitativer Genauigkeitsmaße umfangreiche Kalibrieruntersuchungen notwendig, da die von den Herstellern angegebenen Parameter stark auf die vorteilhaften Sensoreigenschaften bezogen sind und somit nur schwer in allgemeingültige Modelle aufgenommen werden können.

Für das vorliegende System kommt diese Problematik in den Fällen zum Tragen, in denen eine zu erwartende Änderung wesentlicher Leistungsparameter wie der Objektpunktgenauigkeit oder der Punktdichte abgeschätzt werden soll, die durch Verwendung eines anderen Scannertyps zu erwarten ist. Eine solche Modifikation der Systemkonfiguration kommt vor allem dann in Betracht, wenn höhere Profilfrequenzen und somit auch Punktdichten am Objekt oder größere Reichweiten der Streckenmessung bei gleichzeitiger Abschätzung der erzielbaren Genauigkeiten benötigt werden.

4.2 Verfahren zur Distanzmessung

4.2.1 Phasenvergleichsverfahren

Das Phasenvergleichsverfahren ist auch unter dem Begriff AMCW-Verfahren (Amplitude Modulation Continuous Wave) bekannt. Hiermit lassen sich in der Regel deutlich höhere Abtastraten als mit dem Verfahren der Impulslaufzeitmessung erzielen (Bailey, 2002). Aufgrund der möglichen Datenraten von $f_S \leq 500.000$ Hz eignet sich dieses Messprinzip insbesondere für den Einsatz auf bewegten Plattformen.

Zur Distanzmessung wird eine amplitudenmodulierte Trägerwelle von einer Sendediode permanent emittiert und gleichzeitig von einer Empfangsdiode erfasst. Abbildung 4.2 zeigt eine einfach amplitudenmodulierte Trägerwelle, die zur Bestimmung der Raumstrecke zwischen Sender/Empfänger und Objekt verwendet wird.

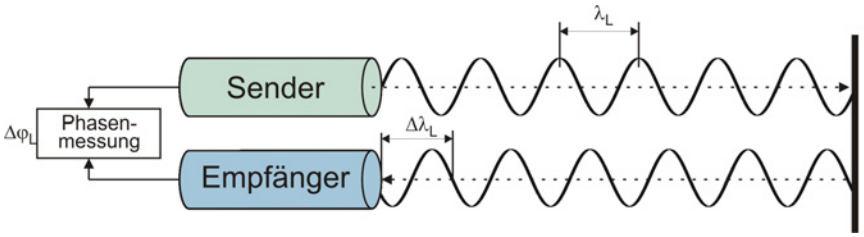


Abbildung 4.2: Phasenvergleichsverfahren

Die formelmäßige Darstellung des Messprinzips wird an dieser Stelle als bekannt vorausgesetzt, kann jedoch auch der Literatur entnommen werden (Kern, 2003); (Rietdorf, 2005); (Deumlich und Staiger, 2002). Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist der begrenzte Eindeutigkeitsbereich der Entfernungsmessung, der dem Wert der halben Modulationswellenlänge λ_L entspricht. Innerhalb des Eindeutigkeitsbereiches ergibt sich die Raumstrecke S_R durch die Hälfte der im Hin- und Rückweg durchlaufenen Entfernung:

$$S_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varphi_L^E - \varphi_L^S}{2\pi} \cdot \lambda_L \tag{4.1}$$

Unter der Voraussetzung, dass die Genauigkeit der Bestimmung der Phasenlage $\sigma_{\varphi_L^S} = \sigma_{\varphi_L^E}$ in Sender und Empfänger gleich groß ist, ergibt sich für die Genauigkeitsbetrachtung der Raumstrecke

$$\sigma_{S_R}^2 = \frac{1}{4\pi} \cdot (2\lambda_L^2 \cdot \sigma_{\varphi_L}^2 + \Delta\varphi_L^2 \cdot \sigma_{\lambda_L}^2). \tag{4.2}$$

Gleichung (4.2) macht deutlich, dass Wellenlänge und Genauigkeit der Entfernungsmessung in einem umgekehrt proportionalen Verhältnis zueinander stehen.

Um die Anzahl der vollen Wellenlängen zu bestimmen und den Eindeutigkeitsbereich zu erhöhen, werden bei Laserscannern zwei- (Fröhlich, 1996) oder mehrfrequente Phasendifferenzverfahren eingesetzt. Hierbei wird das bereits modulierte Signal mit einer zweiten Welle überlagert, die eine deutlich größere Periodenlänge besitzt. Die maximale Messentfernung ist jedoch nicht auf den Eindeutigkeitsbereich der größten Wellenlänge begrenzt, sondern kann unter Berücksichtigung von Zusatzbedingungen wie einer minimalen Objektdistanz nach Hesse u. a. (2005) sowie Hesse und Kutterer (2006) innerhalb gewisser Grenzen verschoben werden werden.

Beim Phasenvergleichsverfahren wirken sich diffus reflektierende Oberflächen und insbesondere Teilreflexionen an Objekt und Hintergrund nachteilig auf die Genauigkeit der Streckenmessung aus. Die durch Teilreflexionen entstehenden Fehlmessungen im Objektraum lassen sich durch verschiedene Verfahren im Nachgang einer Messung bereinigen. Hancock u. a. (1998) beschreiben dieses Problem und schlagen einen sogenannten „Mixed-Pixel-Filter“ zur Eliminierung dieser Fehlmessungen vor.

4.2.2 Impulslaufzeitverfahren

Das Impulslaufzeitverfahren wird auch als TOF-Verfahren (Time Of Flight) bezeichnet und ist bei Laserscannern das am häufigsten anzutreffende Verfahren. Hierbei wird ein sehr kurzer Laserimpuls mit einer Länge von ca. 5 ns von der Sendediode ausgesandt, vom Objekt reflektiert und von einem in der Regel koaxialen Empfänger registriert (Abbildung 4.3).

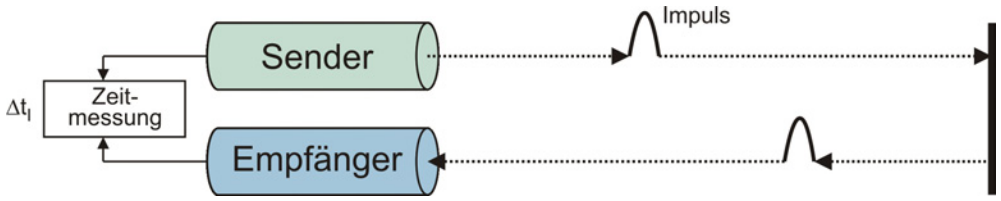


Abbildung 4.3: Impulsmessverfahren

Durch Messung der Zeitdifferenz Δt_I zwischen Aussendung und Empfang des Impulses ergibt sich die Raumstrecke S_R:

$$S_R = \frac{c \cdot \Delta t_I}{2} \tag{4.3}$$

Bedingt durch die große Geschwindigkeit des Lichts werden hohe Anforderungen an die Zeitmessung gestellt. Für eine Streckenmessgenauigkeit von 1 mm folgt durch Umstellung von (4.3) die Genauigkeit der Messung einer Zeitdifferenz aus:

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{2 \cdot \sigma_{S_R}}{c} = \frac{2 \cdot 0.001 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 0.0066 \text{ ps}. \tag{4.4}$$

Die Genauigkeit der Streckenmessung in Formel 4.4 ist theoretisch unabhängig von der zu messenden Strecke. Hieraus wird klar, dass die Gesamtgenauigkeit der 3D-Punktbestimmung wesentlich durch eine präzise Zeitmessung bestimmt wird.

Ein zweites Problem ist hier der auftretende Jitter der ansteigenden und abfallenden Signalflanke, so dass die Genauigkeit der Streckenmessung realistisch im Bereich von $\sigma_{S_R} = 10$ mm einzuordnen ist (Fröhlich, 1996). Eine Maßnahme zur Verbesserung der Streckenmessgenauigkeit ist die Mehrfachmessung der Raumstrecke mit anschließender Bildung des arithmetischen Mittels. Hierdurch lassen sich stochastische Effekte merklich reduzieren, die systematischen Fehleranteile bleiben jedoch erhalten.

Bei Verwendung des Impulslaufzeitverfahrens ist die maximale Entfernung im Wesentlichen durch die Stärke des Laserimpulses limitiert. Probleme bereitet bei der Realisierung eines großen Entfernungsmessbereiches vor allem das Signal-Rausch-Verhältnis bei größeren Distanzen, weshalb die Signalprozessierung bei diesen Geräten einen hohen Aufwand erfordert. Problematisch im Hinblick auf die Objekteigenschaften sind hierbei vor allem Messungen auf spiegelnde Oberflächen oder Materialien, die im Vergleich zur Wellenlänge des Lasers eine erhöhte Rauigkeit aufweisen. Diese bewirken eine diffuse Reflexion des Signals und dadurch eine erschwerte Bestimmung des Signalmaximums, was sich negativ auf die Genauigkeit der Streckenmessung auswirkt.

4.3 Gesichtsfeld

Im Hinblick auf die Größe des Gesichtsfeldes können Laserscanner nach Staiger (2005b) in die drei Klassen Kamera-, Panorama- und Hybridscanner eingeteilt werden (Abbildung 4.4).

Die sogenannten Kamerascanner können standardmäßig keine Drehung des Scankopfes um ihre Stehachse vollziehen, wodurch sie ein eng begrenztes Gesichtsfeld von in der Regel weniger als 50° x 50° besitzen. Das Einsatzgebiet dieser Scanner liegt somit vor allem in der Aufnahme einzelner Objekte mit

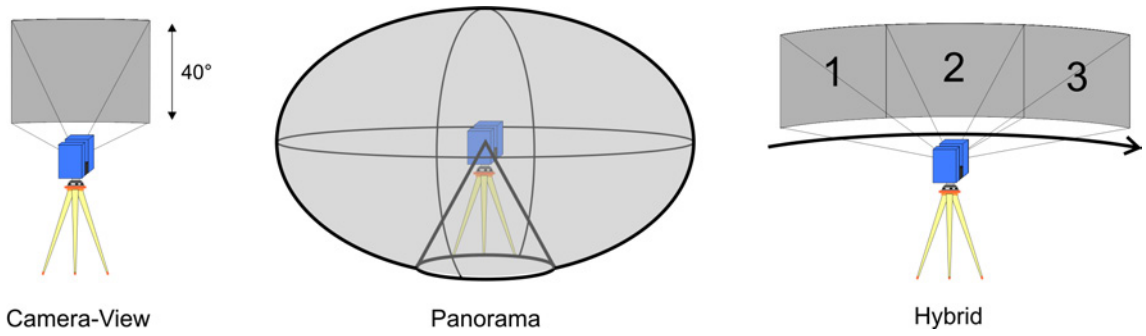


Abbildung 4.4: a) Camera View Scanner b) Panoramascanner c) Hybridscanner

begrenzter räumlicher Ausdehnung. Ein Einsatz vor allem im Bereich der profilgebenden Vermessung ist aufgrund dieser Einschränkungen nicht sinnvoll.

Im Gegensatz zu Kamerascannern ist das Gesichtsfeld von Hybridscannern lediglich in der vertikalen Ausdehnung begrenzt. Zur Objekterfassung werden vom Scanner kontinuierlich Vertikalprofile erfasst, wobei der Scankopf während der Aufnahme mit Schrittmotoren um seine Stehachse gedreht wird. Abweichend von Staiger (2005b), der nur Scanner mit Polygonspiegel (Abbildung 4.5) als Hybridsysteme betrachtet, sollen hier auch Geräte mit oszillierendem Spiegel zu dieser Gattung gezählt werden, sofern sie den vorgenannten Anforderungen entsprechen.

Panoramascanner vollziehen zur Objekterfassung ebenfalls eine vollständige Drehung des Scankopfes um die Stehachse des Gerätes. Sie besitzen jedoch ein vertikal maximal ausgedehntes Gesichtsfeld, das nur durch ihre eigene Standfläche begrenzt ist. Hierdurch kann die Umgebung des Scanners in der Regel vollständig mit einem 360°-Scan erfasst werden.

Geräte mit Phasenvergleichsmessung und rotierendem Spiegel sind nahezu ausschließlich als Panoramascanner realisiert (Abbildung 4.5). Aufgrund des maximalen Gesichtsfeldes in vertikaler Richtung eignen sich diese Scannertypen hervorragend zur profilmäßigen Erfassung in kinematischen Messsystemen.

4.4 Strahlablenkung

Die Art der Ablenkung des Laserstrahls ist häufig sowohl mit dem Gesichtsfeld als auch mit dem Verfahren zur Distanzmessung verbunden, da hohe Datenraten der Distanzmessung eine ausreichend schnelle Form der Strahlablenkung erfordern. Hierbei haben sich im Wesentlichen die Strahlablenkung mit oszillierendem und rotierendem Spiegel (Abbildung 4.5) durchgesetzt. Bei Geräten mit rotierendem Spiegel kann zudem noch zwischen rotierendem Polygonspiegel (Riegl) und einem gegen die Kippachse angewinkelten Spiegel (Zoller+Fröhlich, Faro, Callidus) unterschieden werden.

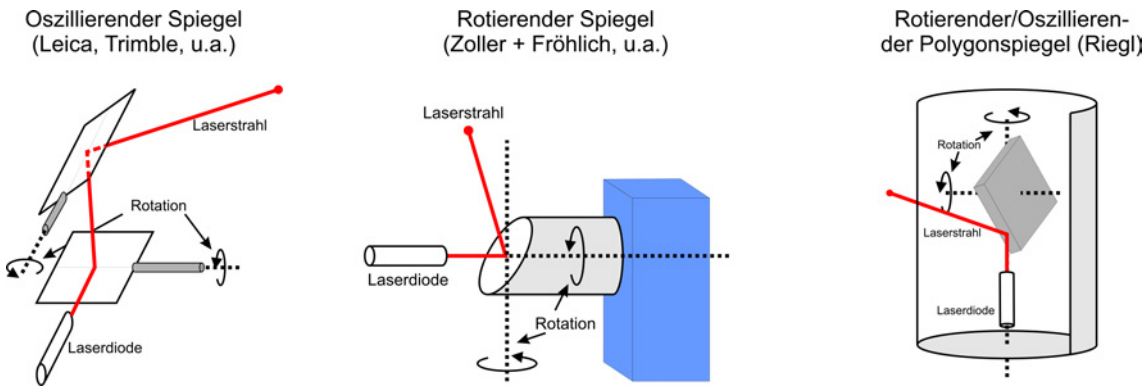


Abbildung 4.5: Unterschiedliche Arten der Strahlablenkung

Die Scangeschwindigkeit in horizontaler Richtung ist direkt von der Art der Spiegelbewegung abhängig. So besitzen Systeme mit oszillierendem Spiegel aufgrund der Trägheit des Spiegels und der notwendigen Umkehrung der Bewegungsrichtung geringere horizontale Erfassungsgeschwindigkeiten, da eine Umkehr

der Scanrichtung zwischen zwei Profilen notwendig wird. Bei einigen Modellen werden die Objektpunkte sowohl in der Aufwärts- als auch in der Abwärtsbewegung Punkte erfasst, so dass in diesem Fall von einer gegenläufigen Zeilen- oder Spaltensequenz gesprochen wird. Die Geschwindigkeit in vertikaler Richtung - also innerhalb einer Scanzeile - ist jedoch im Wesentlichen von der Qualität der signalverarbeitenden Komponenten abhängig.

Insbesondere bei der Betrachtung der Strahlablenkung von aktuellen Scannermodellen wird deutlich, dass prinzipiell jeder Scanner in der Lage ist, Profilmessungen durchzuführen. Aufgrund der hierzu notwendigen schnellen Bewegung der Ablenkeinheit (Spiegel) kommen jedoch nur Geräte mit rotierendem Schräg- und Polygonspiegel hierfür in Frage. Systeme mit rotierenden Spiegeln sind bedingt durch ihre konstante Drehgeschwindigkeit in der Lage, Profilfrequenzen von $f_P = 50$ Hz (Zoller+Fröhlich Imager 5006) zu realisieren. Der von der Firma Riegl verwendete Polygonspiegel kann sowohl oszillierend als auch rotierend eingesetzt werden, um ihn je nach Anwendung auf maximale Profilfrequenzen (rotierend) oder auf maximale Datenraten in Zeilenrichtung (oszillierend) zu optimieren.

4.5 Profilmessende Scanner

4.5.1 Vorauswahl

Obwohl eine breit gefächerte Auswahl an profilmessenden Laserscannern am Markt existiert, kommen nicht alle Geräte für das vorliegende System in Frage. Eine der Anforderungen an das zu entwickelnde Mapping System bestand in der weitgehenden Verwendung von Standardkomponenten.

Parameter	**Imager 5003**	**Imager 5006**	**Imager 6000-300**	**LS 880**	**TS2**	**LMS Z390**	**LMS 200**
Hersteller	Z+F	Z+F	Z+F	Faro	SpaceTec	Riegl	Sick
Distanzmessung							
Messbereich [m]	53.5	79	53.3	76.7	k.A.	< 300	80
Genauigkeit [mm]	$< 8^1$	$< 2^1$	$< 8^1$	$> 3^2$	k.A.	6^3	$< 25^4$
Vertikalwinkel							
Gesichtsfeld [°]	310	310	400	320	290	80	180
Schrittweite [°]	0.018	0.0018	0.018	0.009	0.036	0.002	0.25-1
Punktabstand[5] [mm]	6	0.6	6	3	12	0.7	350-87
Profilfrequenz [Hz]	$\leq$33	$\leq$50	300	k.A.	90	20	75-18.7
Gewicht [kg]	16	14	k.A.	14	k.A.	14.5	4.5

[1]Linearität + Rauschen, bezogen auf 25 m [2]Bestmögliche Linearität, bezogen auf 25 m
[3]nur Rauschen, bezogen auf 50 m [4]System. Unsicherheit + Rauschen [5]Bezogen auf 25 m

Tabelle 4.2: Auswahl verfügbarer Profilscanner

Tabelle 4.2 zeigt eine Auswahl der am Markt verfügbaren Systeme in der Übersicht. Eine ausführliche Darstellung der technischen Daten kann Anhang A entnommen werden. Im Hinblick auf eine Einsetzbarkeit der verfügbaren Laserscanner im Rahmen der vorliegenden Arbeit lassen sich vier zentrale Anforderungen an den zu wählenden Scanner formulieren:

1. Ausreichend hohe Profilfrequenz von $f_P \geq 20$ Hz
2. Ausreichend hohe Genauigkeit der Streckenmessung von $\sigma_{S_R} \leq 10$ mm
3. Möglichst hohe Auflösung innerhalb eines Profils/Scanzeile (kleine Winkelschritte)
4. Direkte Synchronisierbarkeit der Scandaten

Auf der Grundlage dieser Bedingungen sollen im Folgenden die in Frage kommenden Scannermodelle näher vorgestellt werden.

4.5.2 Zoller+Fröhlich Imager 5003

Der im Jahr 2003 vorgestellte Imager 5003 (Abbildung 4.6) von Zoller+Fröhlich ist auch unter der Bezeichnung Leica HDS 4500 verfügbar. Sein technisches Messprinzip basiert auf dem von Schmidt

und Karl (1988) sowie Fröhlich (1996) vorgestellten System zur dreidimensionalen Umgebungserfassung mit mobilen Robotern. Die technischen Daten werden an dieser Stelle aus Platzgründen nur kurz diskutiert, für eine ausführliche Aufstellung sei auf den Anhang A verwiesen.

Abbildung 4.6: Zoller+Fröhlich Imager 5003

Das Gesichtsfeld des Scanners besitzt eine Größe von vertikal 360° und horizontal 320°, wodurch der Imager als Panoramascanner klassifiziert werden kann (Kapitel 4.3).

Der Imager 5003 führt die Distanzmessung nach dem Phasenvergleichsverfahren durch, was die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich des Eindeutigkeitsbereichs mit sich bringt. Für die Distanzmessung wird das zweifrequente Phasenvergleichsverfahren mit einer Feinfrequenz von 45.454 MHz und einer Grobfrequenz von 2.804 MHz eingesetzt. Dies entspricht Wellenlängen von $\lambda_L = 6.6$ m für die Feinmessung sowie $\lambda_L = 107$ m für die Grobmessung (Schulz und Ingensand, 2004b). Hierdurch ist die eindeutige Messentfernung auf $\Delta S_R = 53.5$ m begrenzt.

Auch Objekte, die sich in größerer Entfernung befinden, können grundsätzlich mit diesem Scanner erfasst werden, lassen sich jedoch, bedingt durch die Mehrdeutigkeit der Phasenmessung, nicht korrekt zuordnen. Hesse u. a. (2005) sowie Hesse u. a. (2006) haben gezeigt, dass eine Erhöhung der maximalen Reichweite durch Berücksichtigung einer minimalen Objektdistanz für Entfernungen von bis zu 90 m unter Inkaufnahme einer erhöhten Messunsicherheit möglich ist.

Die vielseitige Einsetzbarkeit dieses Gerätes zeigt sich unter anderem daran, dass der Scanner in den Modi „Scan“ (3D), „Profiler“ (2D) und „Statisch“ (1D) betrieben werden kann, wobei sich die folgenden Ausführungen auf den Profiler Modus beziehen. In jedem der Betriebsmodi können Messungen in einer der vier Auflösungen „Preview“, „Middle“, „High“ und „Super High“ durchgeführt werden, die den in Tabelle 4.3 dargestellten Punktdichten entsprechen. Eine Aufnahme in maximaler Auflösung besteht nach (Stephan u. a., 2003) aus 36.000 Vertikalprofilen mit jeweils 20.000 Punkten pro Profil.

Bei der Wahl der Auflösung ist zu beachten, dass sich diese direkt auf die Scangeschwindigkeit sowie das Datenvolumen der erfassten Punktwolke und indirekt auf die Genauigkeit der Streckenmessung auswirkt. Der Grund hierfür liegt in der Verarbeitung der abgetasteten Phasendifferenzen der Laserdistanzmessung. Während der Messung erfolgt hardwareseitig ein Oversampling der standardmäßig mit 500 kHz beobachteten Phasendifferenzen, um die Genauigkeit der Streckenmessung zu verbessern. Die Oversampling-Rate wird hierbei an die gewünschte Punktdichte angepasst, so dass die typische erzielbare Datenrate f_S realistisch bis zu 125 kHz beträgt (Stephan u. a., 2003).

Somit lassen sich folgende Zusammenhänge formulieren: Je höher die gewählte Auflösung und somit die Anzahl der Punkte pro Profil ist, desto weniger Oversamplingzyklen können für jede zu bestimmende Einzelstrecke vollzogen werden. Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die gegenseitigen Abhängigkeiten der Scanparameter Pixel pro Scanzeile, Profilfrequenz f_P sowie dem anfallenden Datenvolumen.

Modus	**Pixel/Zeile**	$f_{P(Default\ Noise)}$	$f_{P(Low\ Noise)}$	**Datenvolumen**$_{(Default\ Noise)}$
Preview	1250	25 Hz	12.5 Hz	6.4 MB/min
Middle	5000	25 Hz	12.5 Hz	24.1 MB/min
High	10000	33 Hz	16.5 Hz	60.5 MB/min
Super High	20000	25 Hz	12.5 Hz	87.1 MB/min

Tabelle 4.3: Übersicht der verschiedenen Scanauflösungen

Mit Hilfe des optionalen Scanparameters „Low-noise“ kann die Oversampling-Rate zusätzlich um den Faktor zwei erhöht werden, was sich in einer Verdopplung der Messdauer niederschlägt.

Bedingt durch die Tatsache, dass die verwendete Laserklasse 3R nicht uneingeschränkt augensicher ist, besitzt der Scanner einen Schutzmechanismus, der den Laser ausschaltet, wenn sich Objekte innerhalb eines Radius von $S_R = 0.5$ m um den Scanner befinden. Um diese Beschränkung zu umgehen, ist es möglich, den Scanner mit verringerter Laserleistung und einer eindeutigen Messdistanz von $\Delta S_R = 25.2$ m zu betreiben.

Eine Synchronisierung der erfassten Scandaten kann über eine zusätzliche Hardwareschnittstelle des Imager 5003 realisiert werden, für weitergehende Ausführungen sei auf Kapitel 6.2.4 verwiesen.

Die Ansteuerung des Scanners erfolgt über eine IEEE 1394-Schnittstelle (FireWire) mit Hilfe der herstellereigenen Software „LRC-Server“. Diese baut eine Client-Server Verbindung auf Basis des TCP/IP Protokolls vom Notebook zum Scanner auf. Aus diesem Grund wird zum einen die Ansteuerung mit Hilfe eigener Software ermöglicht, zum anderen kann während der Ausführung eines Scanvorganges weiter mit dem Scanner kommuniziert werden. Hierdurch lassen sich Konfigurationsparameter setzen und Statusinformationen wie die Messwerte der internen Temperatursensoren auslesen (Kapitel 6.2.4).

Aufgrund der vergleichsweise hohen Profilfrequenz von bis zu 33 Hz ist der Imager 5003 gut für den Einsatz in der kinematischen Objekterfassung geeignet. Er kann sowohl in Nadir- als auch in Zenitrichtung orientiert betrieben werden, wodurch eine den jeweiligen Anforderungen entsprechende nadir- oder zenitbezogene Erfassung von Umgebungsinformationen gewährleistet werden kann. Die Auflösung in Profilrichtung liegt zwar unterhalb der von Impulslaufzeitscannern, ist jedoch im Hinblick auf die geringe Messentfernung von bis zu 20 m ausreichend.

4.5.3 Zoller+Fröhlich Imager 5006

Abbildung 4.7: Zoller+Fröhlich Imager 5006
(Saeger u. a., 2007)

Der Imager 5006 von Zoller+Fröhlich ist der im Oktober 2006 vorgestellte Nachfolger des Imager 5003 (Abbildung 4.7). Obwohl dieser Scanner eine vollständige Neukonstruktion darstellt, wurde das Messprinzip des zweifrequenten Phasenvergleichsverfahrens mit rotierendem Schrägspiegel beibehalten. Ausgehend von diesen Gemeinsamkeiten und der Tatsache, dass der Scanner zum Zeitpunkt des Systemdesigns noch nicht verfügbar war, beschränken sich die weiteren Ausführungen auf eine Darstellung der wesentlichen Unterschiede.

Die sensorischen Neuerungen bestehen aus einer stark verbesserten Lasermesseinheit, einer um den Faktor 10 erhöhten Auflösung der Winkelencoder und einem integrierten Inklinometer. Darüber hinaus können mit diesem Modell auch Profilmessungen mit einer Frequenz von $f_P = 50$ Hz durchgeführt werden. Eine ausführliche Darstellung der technischen Daten kann Anhang A entnommen werden.

Die Einführung einer zusätzlichen dritten Modulationsfrequenz führt zu einer Erhöhung des eindeutigen Messbereiches auf $\Delta S_R = 79\ m$ bei gleichzeitiger Verringerung der Linearitätsabweichung sowie des Messrauschens (Tabelle 4.2). Durch eine verbesserte Auflösung beider Winkelencoder auf $\Delta\zeta = \Delta\eta = 0.0018°$ werden zwei neue Auflösungsstufen mit der Bezeichnung „Ultra-High“ (40.000 Punkten/360°) sowie einer Maximalauflösung von bis zu 100.000 Punkten/360° ermöglicht. Zusätzlich wurde der Imager 5006 um ein internes Inklinometer erweitert, das nach Herstellerangaben eine Auflösung von $\Delta\varphi_I = 0.001°$ bei einer Genauigkeit von $\sigma_{\varphi_I} = 0.002°$ besitzt. Angaben über den möglichen Messbereich des Inklinometers liegen nicht vor, für weitere technische Daten sei auf die tabellarische Übersicht in Anhang A verwiesen..

Zusätzlich dazu besitzt dieses Modell einen internen Akku und einen PC zur Steuerung des Messablaufs sowie zur Speicherung der Daten, so dass Messungen ohne den Anschluss weiterer Hardware durchgeführt werden können.

Die beim Imager 5006 verbesserte Auflösung der Zenitwinkelmessung und erhöhte Profilfrequenz wirken sich im Vergleich zum Imager 5003 auch bei kinematischen Anwendungen positiv aus. Aufgrund dieser Neuerungen können durch den Einsatz des Imager 5006 in kinematischen Anwendungen die Punktdichten in Profil- und Fahrtrichtung signifikant erhöht werden. Die Möglichkeit zur Synchronisierung der Scannerdaten mit externer Peripherie ist auch bei diesem Modell gegeben, so dass das Gerät für kinematische Anwendungen dieser Art prädestiniert ist.

4.5.4 Riegl LMS-Z390

Die Firma Riegl aus Horn (Österreich) bietet eine Reihe terrestrischer Laserscanner an, die als Hybridscanner konzipiert wurden und sowohl zur dreidimensionalen als auch zweidimensionalen Objekterfassung geeignet sind. Diese Scanner unterscheiden sich nicht nur durch ihre Fähigkeit zur Profilmessung von den Modellen der Wettbewerber, sondern auch durch die variable Art der Strahlablenkung. Diese kann nicht nur durch eine Oszillation des Spiegels in vertikaler Richtung, sondern optional auch durch eine 360°-Rotation um seine Kippachse durchgeführt werden.

Da sich die einzelnen Modelle vornehmlich durch ihre Reichweite, die mögliche Auflösung im Objektraum und die Genauigkeit der Streckenmessung unterscheiden, soll im Folgenden der LMS-Z390 (Abbildung 4.8) stellvertretend vorgestellt werden. Dieser Scanner ist verglichen mit anderen Riegl Scannern auf höhere Genauigkeitsanforderungen für die Strecken- und Winkelmessung bei Reichweiten von bis zu 300 m ausgerichtet. Er bietet darüber hinaus Profilaufnahmen mit Frequenzen von $f_P = 20$ Hz. Weitergehende technische Daten können Anhang A entnommen werden.

Abbildung 4.8: Riegl LMS-Z390
(Riegl, 2007)

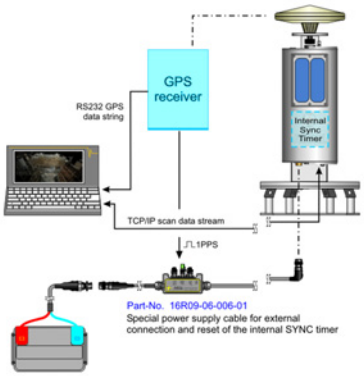

GPS receiver
RS232 GPS data string
Internal Sync Timer
TCP/IP scan data stream
/TL1PPS
Part-No. 16R09-06-006-01
Special power supply cable for external connection and reset of the internal SYNC timer

Abbildung 4.9: Riegl Internal Sync Timer
(Riegl, 2007)

Eine Besonderheit, die von keinem anderen terrestrischen Laserscanner geboten wird, ist die durch ein Erweiterungsmodul des Herstellers gegebene Möglichkeit einer direkten Referenzierung der Scannerdaten. Hierzu wird der PPS-Puls eines GPS-Empfängers über den sogenannten „Internal Sync Timer“ (Abbildung 4.9) in den eigentlichen Datenstrom des Scanners integriert. Der korrespondierende ASCII-String, der benötigt wird, um den mehrdeutigen Rechteckimpuls einer eindeutigen GPS-Zeit zuzuordnen, muss von einem externen PC oder Notebook über die Serielle Schnittstelle erfasst werden. Mit Hilfe der Auswertesoftware von Riegl können Daten und PPS-Signal dann wieder voneinander getrennt werden.

Der Internal Sync Timer kommt sowohl im GeoVan System der Universität Barcelona (Talaya u. a., 2004b) als auch im StreetMapper der Firma 3DLM (3D Laser Mapping, 2007) zur Referenzierung von Profilscans im kinematischen Modus zum Einsatz. Darüber hinaus finden Riegl Scanner auch in Systemen wie dem CityGRID SCANNER der Firma GeoDATA aus Leoben, Österreich Verwendung. Hier erfolgt die Objekterfassung jedoch nicht kinematisch, sondern im Stop-and-Go Modus.

Insgesamt bietet der Riegl LMS-Z390 als einziger terrestrischer Laserscanner mit Laufzeitmessung die Möglichkeit der direkten Datenreferenzierung ab Werk. Durch diese Möglichkeit ist er grundsätzlich zur kinematischen Objekterfassung geeignet und ermöglicht gleichzeitig Profilfrequenzen von $f_P = 20$ Hz sowie eine gute Genauigkeit der Objektpunktbestimmung. Nachteilig für die vorliegende Aufgabenstellung erweist sich hingegen das auf einen Öffnungswinkel von 80° beschränkte Gesichtsfeld, welches eine beidseitige Erfassung von Straßenräumen in einem Scanvorgang verhindert.

4.5.5 Sick Profilscanner

Die Sick AG aus Waldkirch bietet eine große Anzahl profilmessender Laserscanner an, von denen die LD- (Abbildung 4.10) sowie die LMS-Serie (Abbildung 4.10) stellvertretend betrachtet werden sollen.

Vorteilhaft wirken sich bei diesen Scannern ihr vergleichsweise günstiger Preis von weniger als 10.000 Euro sowie ihre kompakte Bauweise aus. Ausgehend hiervon wurde bereits von Hovenbitzer (2003) ein dreidimensionaler Laserscanner vorgestellt, bei dem die Objekterfassung auf Basis eines Sick LMS-200 durchgeführt wird.

Abbildung 4.10: Sick LD
(Sick GmbH, 2007)

Abbildung 4.11: Sick LMS
(Sick GmbH, 2007)

Der Panoramascanner Sick-LD bietet ein Gesichtsfeld von 360° bei einer maximalen Messentfernung von $S_{R,max} = 250$ m und einer Genauigkeit der Streckenmessung von $\sigma_{S_R} \leq 7.5$ cm. Im Unterschied hierzu ist das Gesichtsfeld der LMS-Serie (Abbildung 4.11) auf 180° beschränkt, wodurch diese Modelle den Camera-View-Scannern zuzuordnen sind. Die maximale Objektentfernung ist mit $S_{R,max} = 80$ m kleiner als die der LD-Serie, jedoch wird die Genauigkeit der Distanzmessung vom Hersteller mit einem Wert von $\sigma_{S_R} \leq 2.5$ cm angegeben.

Alle Scanner von Sick arbeiten nach dem Impulslaufzeitverfahren (Kapitel 4.2.2) und bieten je nach Modell bis zu vier Auflösungsmodi mit minimalen Winkelschritten von 1°, 0.5°, 0.25° sowie 0.125° (nur LD-Serie). Auflösungen von weniger als 1° werden bei diesen Scannern mit Hilfe eines Interlace-Verfahrens realisiert, bei dem aufeinander folgende Profile mit einem Winkelversatz von 0.25° (LMS-Serie) beziehungsweise 0.125° (LD-Serie) gegen das vorige Profil verschoben sind. Hierdurch kann die Auflösung der Punktwolke zwar vervielfacht werden, die Profilfrequenz f_P nimmt jedoch aufgrund der zusätzlich notwendigen Spiegeldrehungen für jede Scanzeile um den gleichen Betrag ab. Die maximale Profilfrequenz beträgt für die LMS-Serie bis zu 75 Hz bei Winkelschritten von 1°. Eine ausführliche Übersicht über die technischen Daten der Sick-Scanner ist in Anhang A zu finden.

Zur zeitlichen Referenzierung der Scannerdaten kann ein Triggersignal genutzt werden, welches zu Beginn einer jeden Spiegeldrehung an einer der externen Schnittstellen ausgegeben wird. Angaben über die mögliche Genauigkeit des Synchronisierungssignals liegen nicht vor.

Die Datenübertragung vom Scanner zu einem Messrechner erfolgt über die RS-232/422-Schnittstelle, auf der die erfassten Distanzmesswerte übertragen werden. Eine Messung des Ablenkwinkels für jeden Scanpunkt erfolgt nicht, vielmehr wird eine äquidistante Inkrementierung für jeden Winkelschritt gemäß den vorher definierten Scanparametern angenommen. Nachteilig wirkt sich hierbei aus, dass auftretende Übertragungsfehler zwar durch eine geringere Zahl an Messwerten je Profil erkannt, aufgrund der fehlenden Winkelinformation aber keiner Winkelmessung zugeordnet werden können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Scanner der beiden Modellreihen von Sick grundsätzlich für den Einsatz in Mobile-Mapping-Systemen geeignet sind. Dies ist vor allem durch die vergleichsweise niedrigen Sensorkosten und die hohen Profilfrequenzen begründet, die mit diesen Modellen erzielt werden können. Demgegenüber stehen deutlich niedrigere Auflösungen, verglichen mit den Modellen von Zoller+Fröhlich sowie Riegl. Auch die vom Hersteller angegebenen Genauigkeiten der Punktbestimmung liegen oberhalb von zwei Zentimetern. Bedingt durch diese Tatsache ist der Einsatz als zentraler bildgebender Sensor für die vorliegende Aufgabenstellung nicht sinnvoll. Die Sick-Scanner sind hingegen als ergänzende Profilscanner neben weiteren bildgebenden Sensoren in Mapping-Systemen hervorragend geeignet, um zusätzliche Elemente aus dem Objektraum wie die Fahrbahnquerneigung zu erfassen, wo sie bereits vielfach zum Einsatz kommen (Heister und Gräfe, 2004).

4.5.6 Zusammenfassung

Grundsätzlich bieten die Hersteller terrestrischer Laserscanner eine breite Auswahl profilfähiger Sensoren. Insbesondere in diesem Bereich existiert eine Reihe von Modellen, die für hochspezialisierte Aufgaben entwickelt wurden und zum Teil in sehr geringen Stückzahlen hergestellt werden. Hierzu zählen Sensoren wie der **Zoller+Fröhlich Imager 6000-300** oder die Modelle von **SpaceTec**, welche die Mehrheit der hier gestellten technischen Anforderungen unzweifelhaft erfüllen. Aufgrund der hohen Kosten für diese Geräte kommen sie für eine Verwendung im vorliegenden System nicht in Frage.

Unter Bewertung der in Kapitel 4.5.1 definierten Anforderungen erfüllen nur der **Imager 5003** sowie sein Nachfolger **Imager 5006** von **Zoller+Fröhlich** alle Voraussetzungen für den uneingeschränkten Einsatz im vorliegenden System. Beide Scanner sind als Panoramascanner in der Lage, vollständige Profilmessungen mit Profilfrequenzen von mehr als 25 Hz und einer ausreichend hohen Auflösung im Objektraum durchzuführen. Neben den adäquaten Genauigkeiten der Streckenmessung bieten beide Geräte die Möglichkeit einer direkten Referenzierung der Scannerdaten. Nur hierdurch kann eine präzise Synchronisierung mit anderen Sensoren erfolgen.

Der **Riegl LMS-Z390** ist verglichen mit den Imager-Modellen hinsichtlich Distanzgenauigkeit und Auflösung als gleichwertig anzusehen und bietet ebenfalls die Möglichkeit einer direkten Referenzierung der Scannerdaten mittels PPS-Puls. Nachteilig wirken sich bei diesem Sensor der eingeschränkte Sichtbereich aus, der eine gleichzeitige Aufnahme beider Straßenseiten nur durch Verwendung mehrerer Scanner möglich macht. Zudem ist die Profilfrequenz mit maximal 20 Hz geringer als die der Imager.

Auch die Profilscanner der **LMS- und LD-Serien von Sick** können prinzipiell für Mobile-Mapping-Systeme eingesetzt werden, wie die in Kapitel 2.2 vorgestellten Systeme MoSES, GeoVAN, VLMS und SwissTrolley zeigen. Sie kommen jedoch trotz der vergleichsweise geringen Anschaffungskosten nicht in Frage, da sie die definierten Anforderungen bezüglich der maximalen Auflösung und der Genauigkeit der Streckenmessung nicht erfüllen.

5 Echtzeitfähige Messsysteme

5.1 Anforderungen an die Messhardware

Mobile-Mapping-Systeme sind in ihrer Mehrzahl auf die Erfassung heterogener Umgebungen im Außenbereich ausgerichtet. Aus diesem Grund ist es anstrebenswert, Systeme dieser Art nicht nur in wechselnden Konfigurationen einsetzen zu können, sondern diese auch auf verschiedenen Plattformen zu betreiben. Beispielhaft kann an dieser Stelle das auf der Grundlage des SwissTrolley (Kapitel 2.2.2) entwickelte Mapping-System der Firma Terra genannt werden, das sowohl auf Schienen- als auch auf Landfahrzeugen betrieben werden kann (Müller, 2007). Zur Gewährleistung eines möglichst breiten Einsatzspektrums sollte die Sensorik zur Positionsbestimmung und Umgebungserfassung somit möglichst flexibel an die spezifischen Anforderungen angepasst werden können.

Aus diesem Grund können folgende Anforderungen an die Hardware zur Messdatenerfassung eines Mobile-Mapping-Systems gestellt werden:

- Modularität/Flexibilität (Standardsensorik, Schnittstellen)
- Skalierbarkeit (Erfassungsgeschwindigkeit, Datenvolumen)
- Mobilität (Stromversorgung, Gewicht)
- Kompaktheit (Zahl der Sensoren, all-in-one-Lösung)
- Zuverlässigkeit (Ausfalltoleranz, Redundanz der Sensorik)
- Genauigkeit (Innere/äußere Genauigkeit des Systems, Synchronisierung)

Bei Messsystemen, die im kinematischen Umfeld eingesetzt werden, bestehen aufgrund der Bewegung erhöhte Anforderungen an die Bestimmung der Erfassungszeitpunkte aller Messwerte. Nur hierdurch kann gewährleistet werden, dass Positions- und Objektinformationen auf identische Zeitpunkte bezogen sind und somit nicht nur die Präzision, sondern auch die Richtigkeit von dreidimensionalen Punktinformationen sichergestellt werden kann.

Um die genannten Qualitätskriterien erfüllen zu können, werden im kinematischen Umfeld häufig Messsysteme eingesetzt, die in der Lage sind, Daten mit sehr geringen Verzögerungen zu erfassen und somit häufig als Echtzeitsysteme bezeichnet werden. Der Einsatz eines echtzeitfähigen Messsystems zur Erfassung von Daten und den ihnen zugeordneten Zeitpunkten ist somit integraler Bestandteil eines modernen Mobile-Mapping-Systems. Diese Voraussetzung gilt vor allem für eine Skalierbarkeit im Hinblick auf höhere Erfassungsgeschwindigkeiten, bei der die Synchronisierung der Sensoren zunehmende Bedeutung besitzt.

Zur Realisierung hoher Datenraten und zur Minimierung von Reaktionszeiten ist die Systemleistung echtzeitfähiger Hard- und Software hinsichtlich der Nutzung aller Ressourcen zu optimieren. Echtzeitfähige Messsysteme sind aus diesem Grund vielfach zweigeteilt: Die Erfassung der Messwerte erfolgt in der Regel auf einer hochspezialisierten Echtzeitplattform, die als „embedded"-System bezeichnet wird und ausschließlich zur Durchführung der Datenerfassung zuständig ist. Wird eine solche Plattform ohne externe Peripherie wie Tastatur, Maus und Bildschirm betrieben, spricht man allgemein von einem „Headless-System". Da das embedded-System lediglich einen begrenzten Hauptspeicher besitzt, ist es häufig mit einem PC oder Notebook verbunden.

Abbildung 5.1 zeigt die typische Aufgabenteilung zwischen Echtzeitplattform und Host-System im Schaubild.

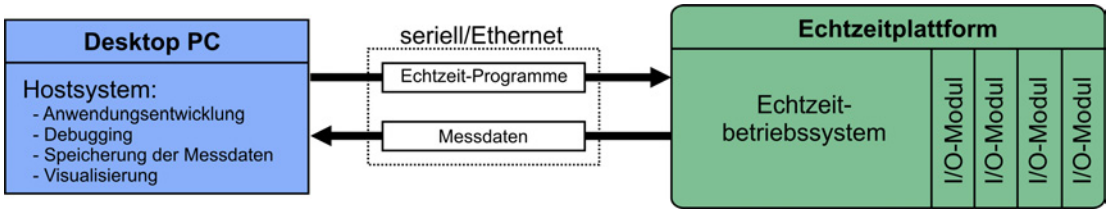


Abbildung 5.1: Kommunikation zwischen Host-PC und Echtzeitsystem

Die Entwicklung von Echtzeitanwendungen findet überwiegend auf dem Host-Rechner statt, der unter Standardbetriebssystemen wie Windows oder Unix/Linux läuft. Über serielle oder Netzwerkverbindungen werden die entwickelten Echtzeitprogramme auf die Echtzeitplattform übertragen, auf der die eigentliche

Messdatenerfassung mit Hilfe der verschiedenen I/O-Module stattfindet. Der Host-Rechner übernimmt die Interaktion mit dem Benutzer, steuert den Messprozess und sorgt für eine dauerhafte Speicherung und Weiterverarbeitung der Messdaten auf Massenspeichermedien.

Neben den diskutierten zeitlichen Forderungen tragen auch die Flexibilität der Systemkonfiguration sowie die Mobilität der Messhardware zur Nutzbarkeit eines Mapping-Systems bei und sind bei der Auswahl einer echtzeitfähigen Hardwareplattform zu berücksichtigen. Hierbei spielen nicht nur die Abmaße eines Systems, sondern auch sein Gewicht und die notwendige Form der Spannungsversorgung eine große Rolle.

5.2 Echtzeitbetriebssysteme

5.2.1 Begriffliche Einordnung der Echtzeit

Bei der Definition des Begriffes Echtzeit wird häufig davon ausgegangen, dass diese direkt abhängig von Parametern wie Systemgeschwindigkeit oder Datendurchsatz ist. Die Geschwindigkeit im absoluten Kontext spielt hierbei jedoch eine untergeordnete Rolle, vielmehr ist die Geschwindigkeit eines Systems im Hinblick auf Echtzeitanwendungen als relative Kenngröße zu betrachten. So bedeutet Echtzeit bei Börseninformationssystemen, dass Kurse innerhalb einiger Sekunden bereitstehen müssen, wohingegen unter der Echtzeitfähigkeit bei der Motorsteuerung maximale Latenzzeiten von wenigen Mikrosekunden verstanden werden (Wörn und Brinkschulte, 2005). Eine Zeitbedingung wird bei echtzeitfähigen Systemen weniger durch die Verarbeitungsgeschwindigkeit, sondern vielmehr durch einzuhaltende Zeitschranken definiert, die auf eine Erfassungs- oder Steuerungsaufgabe bezogen sind (Abbott, 2003).

Obwohl die Geschwindigkeit einer Messdatenerfassung allgemein stark von der Leistungsfähigkeit des zugrunde liegenden Betriebssystems abhängt, ist bei Echtzeitanwendungen zwischen der reinen Softwarekomponente, dem Echtzeitbetriebssystem, und der vollständigen Realisierung eines Systems durch Hard- und Softwarekomponente, dem Echtzeitsystem, zu unterscheiden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass ein echtzeitfähiges System nicht allein durch den Einsatz eines entsprechenden Betriebssystems garantiert werden kann, sondern auch von Mechanismen zur Prioritätssteuerung sowie von Eigenschaften der Hardwareplattform abhängt.

Echtzeitsysteme sind durch ihre Fähigkeit gekennzeichnet, Daten innerhalb einer a priori definierten und reproduzierbaren zeitlichen Toleranz zu erheben oder zu verarbeiten. Als quantitatives Maß für die Leistungsfähigkeit dient hierbei der Zeitraum zwischen dem Auftreten eines Ereignisses und einer definierten Systemreaktion, der als „Latenzzeit“ bezeichnet wird. Im Hinblick auf die Einhaltung vorgegebener Zeitschranken arbeiten Echtzeitsysteme innerhalb systembedingter Grenzen deterministisch (Witzak, 2000). Eine Beantwortung der Frage, ob ein zu entwickelndes System echtzeitfähig sein muss, um bestimmte Aufgaben erledigen zu können, ist somit nicht allgemeingültig zu beantworten und hängt wesentlich vom Einsatzumfeld ab.

5.2.2 Abgrenzung zu konventionellen Betriebssystemen

Der überwiegende Teil von Aufgaben in der elektronischen Datenerfassung ist nicht mit festen zeitlichen Beschränkungen verknüpft. Moderne Betriebssysteme (OS) wie Windows, Unix oder Linux sollen dem Anwender in erster Linie eine möglichst komfortable Arbeitsweise und hohe Systemleistung ermöglichen. In den Fällen, in denen die Korrektheit und Zuverlässigkeit eines Ergebnisses von der Einhaltung zeitlicher Schranken abhängen, wird hingegen der Einsatz von Echtzeitbetriebssystemen notwendig, die in der Fachliteratur überwiegend unter ihrer englischen Bezeichnung „Real-Time-Operating-Systems“ (RTOS) bekannt sind.

Konventionelle Betriebssysteme bestehen häufig aus einer größeren Anzahl an Schichten (S1..Sn), die jeweils aufeinander aufbauen und somit die Funktionalität der darunter liegenden Schichten übernehmen. Niedrigere Schichten besitzen hierbei höhere Rechte als weiter oben gelegene (Abbildung 5.2). Die kritischen Aufgaben innerhalb des Betriebssystems werden von demjenigen Teil wahrgenommen, der als Kern oder bei Vorhandensein vieler Schichten als Makrokern bezeichnet wird. Dieser Makrokern läuft in einem mit dem Begriff „Kernelmode“ bezeichneten Modus, der weitreichende Rechte besitzt und Zugriffe auf zentrale Komponenten des Rechner gestattet.

Echtzeitbetriebssysteme müssen in aller Regel flexibel konfigurierbar sein und auch mit knappen Ressourcen betrieben werden können. Hierzu wird bei vielen Echtzeitbetriebssystemen ein sogenannter „Mi-

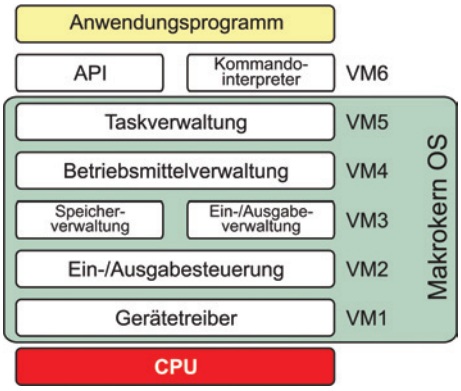


Abbildung 5.2: Monolithischer Kernel
(Wörn und Brinkschulte, 2005)

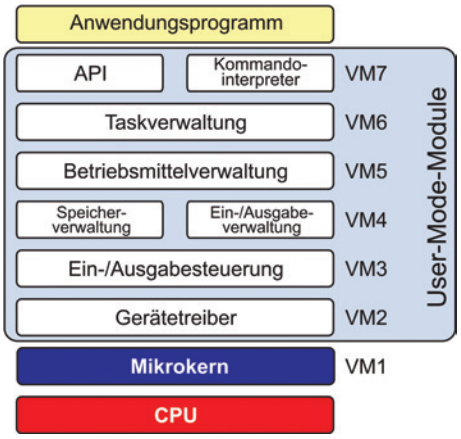


Abbildung 5.3: Mikrokernel
(Wörn und Brinkschulte, 2005)

krokern“ als unterste Schicht nach dem Prozessor eingefügt. Seine Aufgabe besteht darin, für eine klare Entkopplung von Prozessor und allgemeinen Betriebssystemaufgaben zu sorgen, so dass im Kern ausschließlich zwingend notwendige Funktionen enthalten sind. Nach Wörn und Brinkschulte (2005) sind dies:

- Interprozesskommunikation (Kapitel 5.2.9)
- Synchronisation (Kapitel 5.2.10)
- Elementare Taskfunktionen (Einrichtung, Beendigung, Aktivierung, Blockierung)

Auf der Grundlage dieser Basisfunktionen lassen sich aller weiteren Funktionen aufbauen. Der Überwiegende Teil der Betriebssystemaufgaben wird hierbei von sogenannten „User-Mode-Modulen“ übernommen. Diese sind nicht in der Lage, auf wichtige Teile der Hardware zuzugreifen, so dass die Verwaltung der Betriebsmittel, zu dem auch die Prozessorzeit gehört, allein dem Echtzeitbetriebssystem obliegt (Abbildung 5.3).

Wesentliche Unterscheidungsmerkmale zwischen konventionellen Betriebssystemen und Echtzeitbetriebssystemen werden durch Lauber und Göhner (1999) entsprechend Tabelle 5.1 definiert.

Kriterium	**Konventionell**	**Echtzeit**
Steuerung	Daten	Zeit/Ereignisse
Datenstrukturen	komplex	einfach
Datenmenge	hoch	minimal
Optimiert auf	I/O und User Interface	Einhaltung von Zeitbedingungen
Hardwarebezug	hardwareunabhängig	hardwarenah

Tabelle 5.1: Unterscheidungskriterien zwischen konventionellen und Echtzeitsystemen

Allgemeiner formuliert lassen sich echtzeitfähige und nicht echtzeitfähige Betriebssysteme anhand der Qualität der zu liefernden Prozessergebnisse unterscheiden. Während nicht echtzeitfähige Systeme in erster Linie die logische Korrektheit von Ergebnissen gewährleisten, besteht bei Echtzeitbetriebssystemen zusätzlich die unbedingte Forderung nach zeitlicher Korrektheit. Um diese zu gewährleisten, müssen bei der Programmierung von Echtzeitsystemen vier wesentliche Anforderungen erfüllt werden, durch die sich zudem eine Abgrenzung zu Nicht-Echtzeitsystemen ergibt (Wörn und Brinkschulte, 2005):

- Rechtzeitigkeit
- Gleichzeitigkeit
- Verfügbarkeit
- Determiniertheit

Abhängig vom zugrunde liegenden Programmierverfahren lassen sich darüber hinaus zeitgesteuerte und ablaufgesteuerte Systeme unterscheiden, wobei auch Mischformen möglich sind (Lauber und Göh-

NER, 1999). Diese Unterscheidung spielt insbesondere bei der Auswahl des Scheduling-Verfahrens eine wesentliche Rolle (Kapitel 5.2.8).

Eine exemplarische Auswahl verbreiteter Echtzeitbetriebssysteme, die prinzipiell für die Umsetzung der vorliegenden Aufgabenstellung geeignet sind, ist in Anhang B aufgeführt.

5.2.3 Rechtzeitigkeit

Die Forderung nach Rechtzeitigkeit bedeutet in der Terminologie der Echtzeitbetriebssysteme, dass die Reaktion auf ein Ereignis innerhalb einer oder mehrerer fester Zeitschranken begonnen werden oder beendet sein muss. Gebräuchliche Zeitbedingungen können nach LAUBER und GÖHNER (1999) anhand von frühestmöglichem Zeitpunkt (Minimum), spätestmöglichem Zeitpunkt (Maximum), einem Zeitintervall sowie einem exakten Zeitpunkt formuliert werden (Abbildung 5.4).

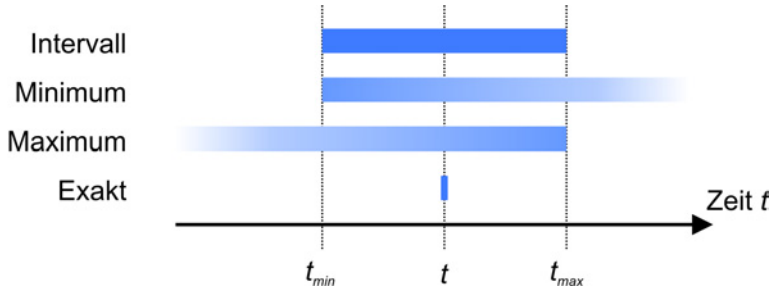


Abbildung 5.4: Festlegung der Zeitbedingungen

Die Definition eines spätestmöglichen Zeitpunktes ist in der Echtzeitprogrammierung häufig anzutreffen. Bezogen auf die Verarbeitung von Signalen wird die Quantifizierung eines maximalen Zeitraumes auch durch den Begriff der Latenzzeit

$$\Delta t_L = t_{Antwort} - t_i \tag{5.1}$$

beschrieben. Hierunter ist derjenige Zeitraum zu verstehen, der vom Eintreten eines Ereignisses zum Zeitpunkt t_i bis zur Ausführung der dazugehörigen Programmroutine, also des Antwortzeitpunktes des Systems $t_{Antwort}$, vergeht. Dabei ist es zunächst unerheblich, ob Ereignisse kontinuierlich über Timer oder aperiodisch über Interrupts ausgelöst werden. In komplexen Systemen, in denen eine wechselseitige Beeinflussung durch verschiedene Aufgaben stattfindet, ist zudem die statistische Schwankung der Latenzzeit zu beachten, die auch als Jitter bezeichnet wird.

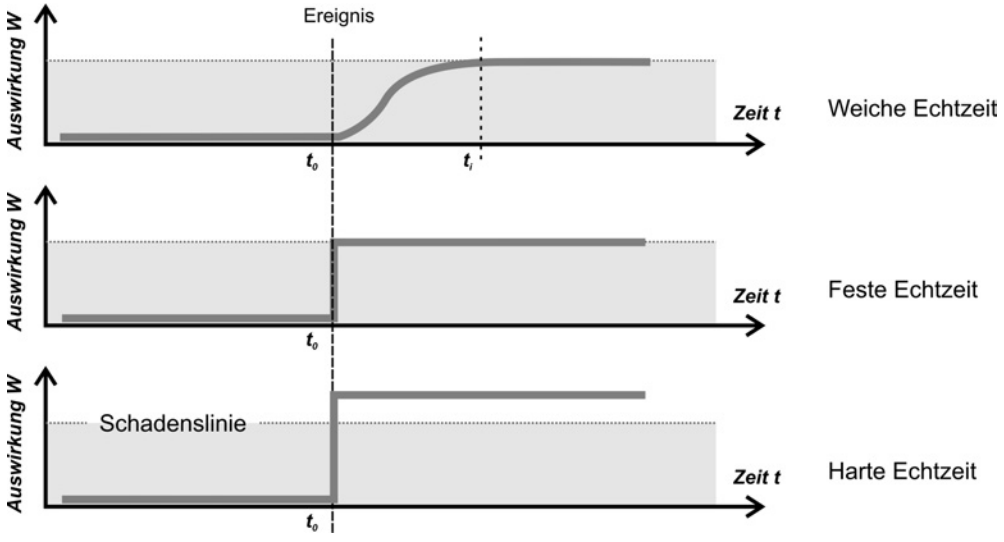


Abbildung 5.5: Unterschied zwischen weichen und harten Echtzeitsystemen

Um den Grad der Abhängigkeit eines Ergebnisses von Zeitschranken und somit auch die Qualität des Echtzeitsystems feiner zu unterteilen, betrachtet man häufig die Auswirkung W, die eine Verletzung

von Zeitbedingungen auf die gewünschte Systemaufgabe hat. Hierbei steht nicht nur die Betriebssystemkomponente, sondern das Echtzeitsystem insgesamt im Vordergrund, da nicht erfüllte Zeitbedingungen unmittelbaren Einfluss auf das Gesamtsystem besitzen.

Schwebel (2002) und Witzak (2000) nehmen eine Klassifizierung in harte und weiche Echtzeitsysteme anhand der Auswirkung vor, die eine verletzte Zeitbedingung auf die Programmaufgabe hat. Diese Einteilung wird von Wörn und Brinkschulte (2005) noch um die Klasse der festen Echtzeitsysteme erweitert, die insbesondere bei kinematischen Messsystemen von Bedeutung ist (Abbildung 5.5).

Bei Systemen mit weicher Echtzeit sind die zeitlichen Rahmenbedingungen im Wesentlichen als Empfehlung anzusehen. Die vorgegebene Zeitschranke kann in diesen Fällen ohne grundlegende Auswirkungen auf das Gesamtergebnis überschritten werden. Eine geringfügige Verletzung der vorgegebenen Zeitbedingung kann jedoch in der Regel häufiger toleriert werden als erhebliche Abweichungen.

Im Gegensatz zur weichen Echtzeit kann bei fester Echtzeit eine Überschreitung der Zeitvorgabe zwar grundsätzlich hingenommen werden, führt jedoch dazu, dass die erfassten oder verarbeiteten Daten unbrauchbar werden. Speziell bei Anwendungen und Programmen, die in kinematischen Echtzeitsystemen zum Einsatz kommen, spielen feste Echtzeitbedingungen eine entscheidende Rolle.

Dies kann der Fall sein, wenn eine Positionsinformation erfasst und im Anschluss dazu genutzt werden soll, um das Bewegungsverhalten eines Systems zu steuern. Ist die in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit gewählte Zeitspanne für die Datenerfassung oder Verarbeitung überschritten, so sind die Messwerte zur Positionierung wertlos, da sich das Fahrzeug bereits an einer anderen Position befindet und eine Korrektur der Bewegungsrichtung zu spät kommen würde. Einschränkungen dieser Art treten bei Auswertungen im Postprocessing nur in Ausnahmefällen auf.

Gegenüber der weichen und festen Echtzeit setzt die Definition einer harten Echtzeit voraus, dass innerhalb eines Prozesses Zeitschranken existieren, die unbedingt einzuhalten sind. Im Gegensatz zur festen Echtzeit treten bei diesen Systemen irreversible Folgen auf, wenn so definierte Zeitschranken nicht eingehalten werden. Dies kann insbesondere der Fall sein, wenn Sensordaten für zentrale Aufgaben in einem Messsystem vorausgesetzt werden, deren nachträgliche Rekonstruktion - zum Beispiel durch asynchrones Auftreten - nicht möglich ist.

Eine weiterführende Diskussion der Echtzeitanforderungen an die Datenerfassung sowie eine Prüfung der vorhandenen Latenzzeiten im vorliegenden System kann Kapitel 7.6 entnommen werden.

5.2.4 Gleichzeitigkeit

Die Forderung nach Gleichzeitigkeit spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn mehrere Sensoren mit hohen zeitlichen Anforderungen in einem System abgefragt werden sollen. Hierunter wird die Fähigkeit eines Systems verstanden, mehrere parallel anfallende Aufgaben ohne signifikante Erhöhung der Latenzzeit auszuführen. Die zulässige Verzögerung durch nicht gewährleistete Gleichzeitigkeit hängt wesentlich von der Art der geforderten Echtzeit und dem zugrunde liegenden Systemdesign ab. Eine Optimierung kann in dieser Hinsicht durch folgende hard- und softwaretechnische Verfahren zur Prozessierung erfolgen:

- Multiprozessorsystem mit paralleler Prozessierung
- Multiprozessorsystem mit quasi-paralleler Prozessierung (Kapitel 5.2.8)
- Einprozessorsystem mit quasi-paralleler Prozessierung (Kapitel 5.2.8)

Die Verwendung von Multiprozessorsystemen ist im Vergleich zum Einprozessorsystem die leistungsfähigere aber auch kostenintensivere Lösung. Bei paralleler Prozessierung wird jedem Prozessor nur eine Aufgabe beziehungsweise ein Prozess zugeordnet, so dass dieser nicht durch andere Aufgaben belastet wird. Hierbei ist die Gesamtzahl der möglichen Prozesse jedoch stark eingeschränkt. Eine solche Begrenzung kann mit Hilfe einer quasi-parallelen Prozessierung umgangen werden, bei der alle Aufgaben mit Hilfe einer intelligenten Betriebssystemroutine, dem sogenannten „Scheduler“, auf die verfügbaren Prozessoren aufgeteilt werden (Kapitel 5.2.8). Auch bei nur einem zur Verfügung stehenden Prozessor kann eine Verwaltung der anstehenden Aufgaben durch einen Scheduler erfolgen (Wörn und Brinkschulte, 2005).

5.2.5 Verfügbarkeit

Sowohl Rechtzeitigkeit als auch Gleichzeitigkeit setzen voraus, dass Echtzeitsysteme ständig betriebsbereit sein müssen. Diese Bereitschaft wird allgemein als Verfügbarkeit definiert und soll gewährleisten, dass ein System ständig in der Lage ist, auf Ereignisse innerhalb definierter Zeitbedingungen zu reagieren.

Problematisch wirkt sich in dieser Hinsicht aus, dass nahezu alle Betriebssysteme sogenannte Reorganisationszyklen zur Indizierung, Speicherneuordnung oder anderen systeminternen Wartungsaufgaben benötigen. Während solcher Zyklen ist das System stark ausgelastet und kann somit die Rechtzeitigkeitsbedingung für anstehende Aufgaben nicht in jedem Fall erfüllen (Wörn und Brinkschulte, 2005).

Der Aspekt der Verfügbarkeit ist bereits während der Systemplanung und insbesondere bei der Priorisierung von Aufgaben zu beachten. So kann die Verfügbarkeit des Systems durch die Vergabe hoher Prioritäten an eine große Zahl von Prozessen signifikant eingeschränkt werden.

5.2.6 Determiniertheit

Neben den bereits diskutierten Kriterien der Rechtzeitigkeit, Gleichzeitigkeit und Verfügbarkeit besteht zudem die Forderung nach Determiniertheit des Systems. Im Gegensatz zu sequentiell ablaufenden Programmen spielt diese Forderung bei ereignisgesteuerten Echtzeitsystemen eine entscheidende Rolle, da das Systemverhalten durch asynchrone Ereignisse nicht in jedem Fall vorhersagbar ist.

Ein determiniertes System gewährleistet nicht nur die funktionale Vorhersagbarkeit eines Ergebnisses, sondern ermöglicht insbesondere die Prädizierbarkeit von Reaktions- und Latenzzeiten. So werden diejenigen Systeme, bei denen auch die Antwortzeit für die Bereitstellung von Ergebnissen und die Verarbeitung von Daten vorhersagbar ist, als zeitlich determiniert bezeichnet. Diese Eigenschaft ist speziell bei harten Echtzeitanforderungen notwendig, um auftretende Ereignisse innerhalb der vorgegebenen Zeitschranken abzuarbeiten und somit auch die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten (Lauber und Göhner, 1999).

Allgemein wird die Determiniertheit eines Systems von einer Vielzahl an Parametern bestimmt. Bei echtzeitfähigen Messsystemen zur Datenerfassung sind dies unter anderem die Anzahl und die Frequenz parallel auftretender Datensignale, die Priorität ihrer Erfassung sowie die dafür zulässige Latenzzeit.

5.2.7 Taskverwaltung

Durch die zunehmende Modularisierung von Datenerfassungsprozessen sind nicht nur in Echtzeitsystemen eine große Zahl von Aufgaben in Form von Programmen parallel oder annähernd parallel abzuarbeiten. Die Ausführung eines Programms oder seiner Teile auf einem Prozessor wird allgemein als Task, die Menge aller Tasks als Taskset bezeichnet.

Bedingt durch die Tatsache, dass einzelne Prozessorkerne nur jeweils eine Aufgabe zur gleichen Zeit verarbeiten können, muss die zur Verfügung stehende Prozessorzeit auf alle anstehenden Aufgaben und somit alle Tasks verteilt werden. Der Begriff Multitasking beschreibt in diesem Zusammenhang die Fähigkeit eines Systems zur quasi-gleichzeitigen Ausführung von Tasks. Bekannte Formen des Multitasking sind:

- Echtes Multitasking (hardwareseitig)
- Preemptives Multitasking (softwareseitig)
- Kooperatives Multitasking (softwareseitig)

Das so genannte echte Multitasking benötigt als zwingende Voraussetzung mindestens zwei unabhängige physikalische Prozessoren oder Prozessorkerne, auf denen die zeitgleiche Verarbeitung von Befehlen stattfinden kann. Aufgrund der hohen Hardwareanforderungen kommt diese Form des Multitasking nur dann zur Anwendung, wenn eine sehr hohe Systemleistung benötigt wird.

Sind in einem System mehr Aufgaben parallel zu bearbeiten, als physikalische Prozessoren zur Verfügung stehen, kommen preemptive und kooperative Multitasking-Verfahren zum Einsatz, die sich hauptsächlich durch die Art der Prioritätsvergabe unterscheiden. Beim kooperativen Multitasking wird die zur Verfügung stehende Rechenzeit von allen laufenden Tasks selbst verwaltet. In diesem Fall bestimmt jede Task selbst, wann sie die Kontrolle über den Prozessor wieder abgibt, so dass das System in der Regel nicht auf Ereignisse reagieren kann, die außerhalb des Einflussbereichs der gerade aktiven Task liegen. Beim

preemptiven Multitasking erfolgen Zuteilung und Entzug von Rechenzeit durch eine Betriebssystemkomponente auf niedriger Ebene (Abbildung 5.3), so dass theoretisch eine durchgehende Reaktionsfähigkeit des Systems gesichert ist. Aus diesem Grund kommt in Echtzeitsystemen überwiegend das preemptive Multitasking zum Einsatz (Lauber und Göhner, 1999); (Wörn und Brinkschulte, 2005).

Zur Ausführung ihrer Aufgaben sind Tasks in der Lage, verschiedene Betriebszustände anzunehmen. Jede Task befindet sich nach ihrer Anmeldung beim Betriebssystem zunächst in ruhendem Zustand. Durch periodische Aktivierung oder Auslösung eines Ereignisses wird die Task ablaufwillig und fordert beim Betriebssystem die Kontrolle über den Prozessor an. Wird ihr diese Kontrolle in Form von Rechenzeit zugeteilt, erfolgt die Abarbeitung der entsprechenden Programmfunktionalität (Abbildung 5.6). Sollte zu diesem Zeitpunkt bereits eine Task die Kontrolle über den Prozessor besitzen, so wird je nach Priorisierungsverfahren eine der beiden Tasks vorübergehend in den Zustand „Blockiert“ versetzt. Die verschiedenen Zeitschranken und ihre Definitionen, die zum näheren Verständnis der Taskverwaltung notwendig sind, werden in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

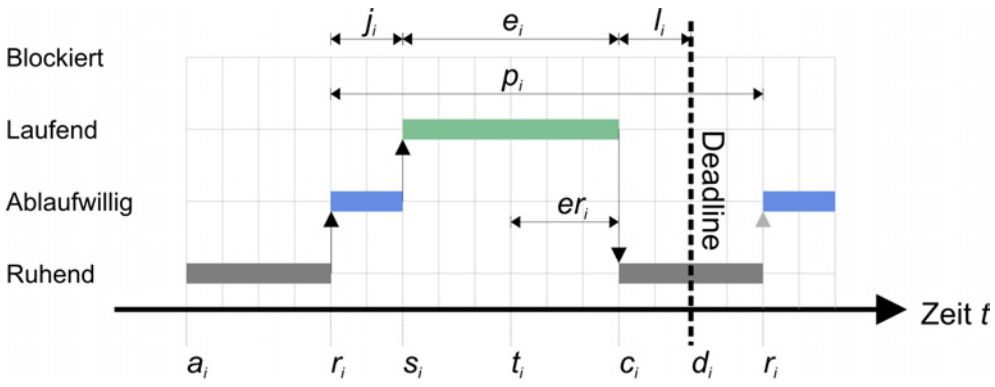


Abbildung 5.6: Zeitparameter einer Task

5.2.8 Taskumschaltung/Scheduling

Die Verteilung der vorhandenen Prozessorzeit auf alle ablaufwilligen Tasks eines Tasksets ist eine der Kernaufgaben des Betriebssystems. Der hierzu notwendige Zuteilungs- und Priorisierungsvorgang wird als Scheduling oder auch Echtzeitscheduling bezeichnet. Ein Echtzeit-Scheduler ist eine Softwarekomponente auf niedriger Betriebssystemebene, die zur Verwaltung der Rechenzeit dient und in der Lage ist, einer Task die Kontrolle über den Prozessor zu gewähren und abhängig vom Typ des Schedulers auch jederzeit wieder zu entziehen.

Zur Umsetzung des gewünschten Systemverhaltens existieren eine Reihe von Scheduling-Verfahren, die sich im Wesentlichen durch zwei Kriterien voneinander unterscheiden:

- Priorisierung der Tasks: dynamisch/statisch
- Behandlung konkurrierender Tasks: preemptiv/nicht-preemptiv

Die Vergabe von Prioritäten ist eine wesentliche Voraussetzung für die vom Scheduler durchzuführende Taskplanung. Die hierdurch festgelegte gegenseitige Gewichtung der Tasks kann zum einen bereits zur Entwurfszeit des Systems durch den Entwickler festgelegt werden. Eine solche statische Festlegung ist während des Systembetriebs unveränderlich. Zum anderen kann die Vergabe von Prioritäten vollständig auf den Scheduling-Algorithmus delegiert werden, so dass eine flexible Anpassung an den jeweiligen Systemzustand möglich ist. Diese dynamische Form der Priorisierung von Tasks ist vor allem bei aperiodisch auftretenden Systemereignissen sinnvoll, wenn die installierten Tasks unterschiedliche Relevanz für das Gesamtsystem besitzen, erzeugt jedoch aufgrund der regelmäßigen Neuplanung des Taskablaufes eine erhöhte Systemlast.

Neben der Priorisierung ist die Konfliktbehandlung bei gleichzeitiger Anforderung von Prozessorzeit durch zwei oder mehrere Tasks das entscheidende Kriterium zur Klassifizierung von Scheduling-Algorithmen. Ist der Scheduler in der Lage, laufende Tasks zu unterbrechen, wenn höher priorisierte Tasks ablaufwillig werden, wird dieser als preemptiver Scheduler bezeichnet. Ist ein Algorithmus nicht preemptiv, müssen alle ablaufwilligen Tasks die Rückgabe der Kontrolle über den Prozessor abwarten

Größe	Beschreibung
a_i	**Ankunftszeit:** Zu diesem Zeitpunkt wird die Task beim Betriebssystem angemeldet und in das Taskset aufgenommen. Die Kontrolle über die Task liegt jetzt beim Scheduler.
r_i	**Anforderungszeit:** Die Task wird aufgrund eines definierten Ereignisses (Timer oder Interrupt) ablaufwillig und fordert Prozessorzeit an.
s_i	**Startzeit:** Die Task erhält Prozessorzeit zugeteilt und führt ihre Programmfunktionalität aus.
c_i	**Beendigungszeit:** Der Programmcode der Task ist abgearbeitet, die Task beendet die Nutzung des Prozessors und geht wieder in den Ruhezustand über.
d_i	**Zeitschranke/Deadline:** Vom Anwender/Systementwickler vorgegebene maximale Ausführungszeit der Task. Formen der Definition von Zeitschranken sind weich, fest und hart (Abbildung 5.5).
p_i	**Periodendauer:** Bei periodisch auszuführenden Tasks kennzeichnet dieser Parameter die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausführungen.
e_i	**Ausführungszeit:** Die Ausführungszeit ist die Zeitspanne, während der sich die Task im Zustand „Laufend“ befindet. Eine bei Echtzeitbetriebssystemen wichtige Konkretisierung ist die maximal zulässige Ausführungszeit, die als Worst-Execution-Time bezeichnet wird. Hierdurch wird speziell bei harten Echtzeitanforderungen (Kapitel 5.4) die äußerste Zeitschranke definiert, bis zu der eine Task beendet sein muss.
er_i	**Restausführungszeit:** Die noch verbleibende Zeit, die eine Task bis zu ihrer Beendigung benötigt, wird als Restausführungszeit bezeichnet. Sie spielt vor allem in der Taskplanung durch den Scheduler eine Rolle.
l_i	**Spielraum/Laxity:** Verbleibender Zeitraum zur Ausführung der Task bis zum Erreichen der Zeitschranke d_i. Diese Größe wird auch als Laxity bezeichnet. Eine Reihe von Scheduling-Verfahren verwenden diese Zeitmarke als Grundlage der Priorisierung.
j_i	**Reaktionszeit:** Die Reaktionszeit ist der Zeitraum, der zwischen der Anforderung einer Task (zum Beispiel durch Timer oder Interrupts) und ihrer Ausführung als laufende Task vergeht. Durch Systemlast und wechselseitige Beeinflussung verschiedener Tasks kann diese Zeitspanne durchaus variieren.

Tabelle 5.2: Zeitparameter einer Task

(Abbildung 5.7). Hierdurch kann es speziell bei einer ereignisabhängigen Systemsteuerung zur Verletzung der vorgegebenen Zeitbedingung d_i kommen, so dass harte oder feste Echtzeitbedingungen nicht eingehalten werden können.

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Schedulers wird häufig ein Optimalitätskriterium verwendet. Er beschreibt die Fähigkeit des Verfahrens, alle installierten Tasks unter optimaler Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Rechenzeit ohne Verletzung der in Tabelle 5.2 genannten Zeitbedingungen auszuführen und somit Rechtzeitigkeit, Gleichzeitigkeit, Verfügbarkeit und Determiniertheit für das System zu gewährleisten. Hierzu sind folgende Bedingungen vorauszusetzen:

- Es existiert ein Ablaufplan für alle Tasks, dessen Zeitbedingungen sich nicht gegenseitig ausschließen.
- Das Scheduling-Verfahren besitzt die notwendigen Möglichkeiten zur Vergabe von Prioritäten und Steuerung des Ablaufes, um diesen Plan einzuhalten.

Für eine quantitative Analyse von Taskset und Scheduler wird häufig die Kenngröße der Prozessorauslastung H_{CPU} herangezogen. Diese ergibt sich für periodisch aufzurufende Tasks, wie sie in Mobile-Mapping-Systemen anzutreffen sind, nach Wörn und Brinkschulte (2005) über folgende Beziehung:

$$H_{CPU} = \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{p_i}, \text{ mit } \begin{matrix} e_i: \text{ Ausführungszeit} \\ p_i: \text{ Periodendauer} \end{matrix} \tag{5.2}$$

Unter der Voraussetzung, dass ein Ablaufplan für alle ablaufwilligen Tasks existiert, sind optimale Scheduling-Verfahren in der Lage, einen solchen Ablaufplan selbst bei einer maximalen Prozessorlast von

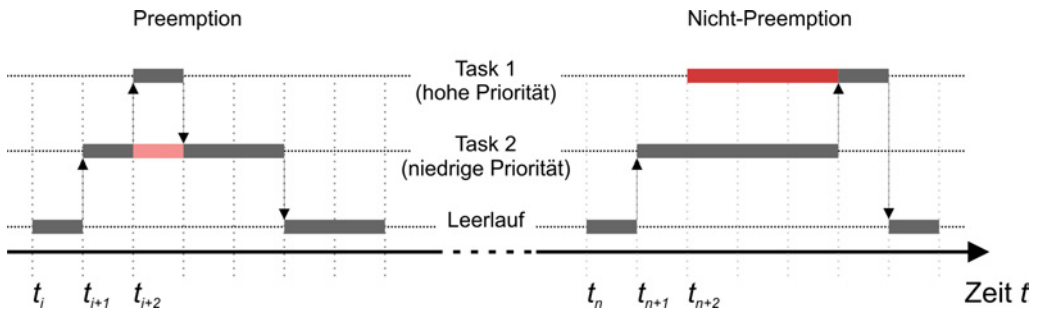


Abbildung 5.7: Preemptives und Nicht-Preemptives Scheduling

$H_{CPU,max} = 100\%$ unter Einhaltung aller Zeitbedingungen zu finden.

Aufgrund der spezifischen Anforderungen, die an echtzeitfähige Systeme gestellt werden, existiert eine große Anzahl verschiedener Scheduling-Verfahren, die auf die Steuerung des Systemverhaltens abgestimmt sind. Sie unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der bereits genannten Kriterien Preemptivität und Priorisierung, sondern auch durch die Komplexität der Algorithmen zur Tasksteuerung und die durch sie verursachte Prozessorauslastung. Eine Auswahl häufig verwendeter Scheduling-Verfahren ist in Abbildung 5.8 zu finden.

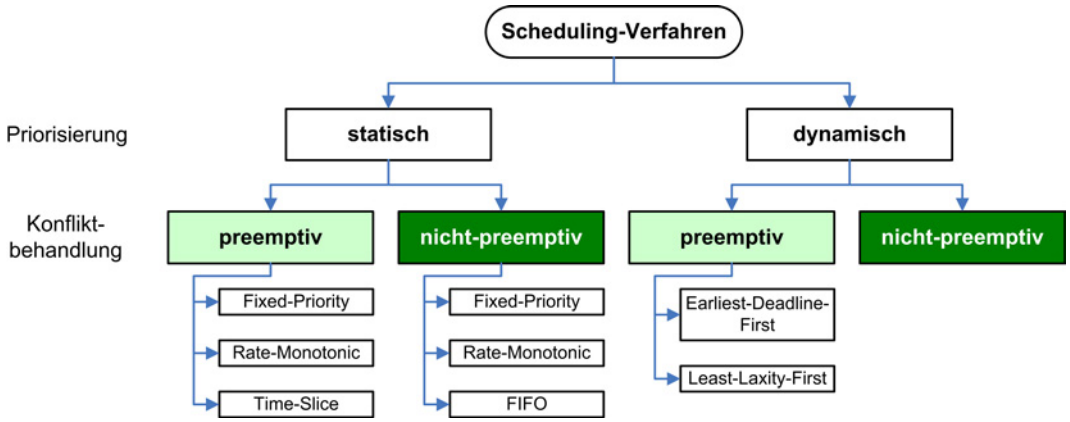


Abbildung 5.8: Klassifizierung der Scheduling-Verfahren

Die einfachste Art der Taskumschaltung ist die des FIFO-Scheduling (First-In-First-Out). Hierbei wird von allen ablaufwilligen Tasks derjenigen die Kontrolle über den Prozessor und somit Rechenzeit zugeteilt, die die längste Wartezeit aufweist. Dieses Verfahren benötigt wenig Rechenleistung, ist jedoch aufgrund der fehlenden Preemptivität nicht in der Lage, auf Ereignisse vorrangig zu reagieren. Somit besteht die Möglichkeit, dass bereits bei geringen Prozessorlasten harte Echtzeitbedingungen verletzt werden, was dieses Verfahren für Echtzeitanwendungen als ungeeignet erscheinen lässt.

Beim Fixed-Priority-Scheduling besitzen alle Tasks feste Prioritäten, die zur Entwurfszeit vorab definiert werden müssen. Dieses einfache Verfahren erzeugt ebenfalls wenig Prozessorlast und bietet sowohl preemptive als auch nicht-preemptive Taskumschaltungen. Somit ist es für eine ereignisgesteuerte Erfassung aperiodischer Signale geeignet, zumal Zeitbedingungen deutlich besser als beim FIFO-Scheduling eingehalten werden können. Das Rate-Monotonic-Scheduling (RMS) stellt einen Sonderfall der Priorisierung von Fixed-Priority-Scheduling Verfahren für periodische Taskaufrufe dar. Hierbei wird jeder Task eine Priorität zugewiesen, die dem inversen Wert ihrer Periodenlänge entspricht. Die Anwendung des RMS kann nach Wörn und Brinkschulte (2005) unter Beachtung folgender Bedingungen geschehen:

- Verwendung der preemptiven Taskumschaltung
- Alle Periodenlängen p_i sind bekannt und über den Messzeitraum konstant
- Die Zeitschranke d_i ist gleich der Periodenlängen p_i
- Die Ausführungszeit e_i ist bekannt und über den Messzeitraum konstant
- Alle Tasks sind voneinander unabhängig und können sich nicht wechselseitig blockieren

Hierbei ist einschränkend zu beachten, dass die Forderung nach $d_i = p_i$ sowie die Kenntnis der Ausführungszeit e_i nicht in jedem Fall erfüllt werden können (Tabelle 5.2).

Die Optimalitätsforderung kann durch das Fixed-Priority-Scheduling mit preemptiver Taskumschaltung jedoch nicht eingehalten werden. So ist es durchaus möglich, dass schon bei einer Prozessorlast von deutlich unter 100% nicht alle Zeitbedingungen eingehalten werden können. Bei periodischen Signalen lässt sich unter Verwendung von RMS eine Obergrenze für die Prozessorlast unter Einhaltung aller Zeitbedingungen herleiten. Nach Liu und Layland (1973) gilt folgender Zusammenhang zwischen der Anzahl der ablaufwilligen Tasks und der maximalen Prozessorlast:

$$H_{CPU,max} = n(2^{1/n} - 1), \quad mit\ n = Anzahl\ der\ Tasks \tag{5.3}$$

Die Ausführbarkeit des Schedules unter Einhaltung aller Zeitbedingungen kann demnach garantiert werden, falls $H < H_{CPU,max}$ und somit:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{p_i} \ < \ n(2^{1/n} - 1) \tag{5.4}$$

Das Time-Slice-Scheduling ist ein weiteres preemptives Verfahren, das mit gleichwertigen Tasks und somit ohne Priorisierung auskommt. Zur Verteilung der verfügbaren Prozessorzeit wird diese in Zeitscheiben beliebiger Größe unterteilt, die allen ablaufwilligen Tasks der Reihe nach zugewiesen werden. Die Reihenfolge der Vergabe richtet sich hierbei nach dem Zeitpunkt, zu dem jede Task ablaufwillig wird. Im Unterschied zum FIFO-Verfahren wartet der Scheduler hierbei nicht auf die Beendigung einer aktiven Task, sondern entzieht ihr nach Ablauf des Zeitfensters den Zugriff auf den Prozessor. Werden die Zeitscheiben zu groß gewählt, steigt das Risiko einer Verletzung von Zeitschranken. Ist die Zeitscheibe hingegen sehr klein, muss der Scheduler häufige Kontextwechsel zwischen den ablaufwilligen Tasks durchführen, was negativen Einfluss auf die Systemleistung hat. Häufig wird die Größe der Zeitscheiben während des Betriebs entsprechend der aktuellen Prozessorauslastung angepasst. Dieses Verfahren benötigt aufgrund seiner Einfachheit nur geringe Ressourcen und stellt ein häufig genutztes Scheduling-Verfahren bei ausreichend schneller Hardware und kleinen Tasksets dar 5.3.2.

Zur Steuerung komplexer Systeme mit einer großen Anzahl verschiedenartiger Signalperioden und Prioritäten existieren eine Reihe weiter entwickelter preemptiver Scheduling-Algorithmen wie das Earliest-Deadline-First- (EDF) oder Least-Laxity-First-Verfahren (LLF). Das EDF berücksichtigt bei der Zuteilung der Rechenzeit den bis zur Verletzung einer Zeitschranke verbleibenden Zeitraum $er_i + l_i$ einer jeden Task. Eine Erweiterung des EDF-Verfahrens stellt das Least-Laxity-First-Scheduling dar, bei dem zusätzlich zur maximalen Restzeit noch die voraussichtliche Dauer der Ausführung einer Task berücksichtigt wird. Diese Verfahren entsprechen dem Optimalitätskriterium und können für Scheduling-Aufgaben bei Prozessorlasten von bis zu 100% eingesetzt werden, um einen bedingungskonformen Ablaufplan zu gewährleisten (Wörn und Brinkschulte, 2005).

5.2.9 Tasksynchronisation

Insbesondere beim Einsatz preemptiver Scheduling-Verfahren in Multitaskingumgebungen besteht die Notwendigkeit, den wechselseitigen Zugriff unterschiedlicher Tasks auf gemeinsam genutzte Ressourcen zu regeln. Hierzu zählen sowohl Hardwareelemente wie geöffnete Schnittstellen und Fließkommaeinheiten als auch Timerobjekte und Speicherbereiche auf der Softwareebene.

Diejenigen Bereiche einer Task im Sinne von Abschnitten des auszuführenden Quellcodes, die Zugriffe auf gemeinsam mit anderen Tasks genutzte Ressourcen benötigen, werden auch als „kritische Bereiche“ bezeichnet. Um Dateninkonsistenzen und Zugriffsverletzungen zu vermeiden, müssen gemeinsam genutzte Ressourcen innerhalb kritischer Bereiche gesperrt werden. Hierzu stehen eine Reihe von Verfahren wie die Sperrsynchronisation oder die Reihenfolgensynchronisation zur Verfügung, die Zugriffe mit Hilfe von Semaphoren regeln können.

Semaphore sind einfache Datenstrukturen, meist in Form eines Bits, die zur Synchronisation von Prozessen oder zur Regelung konkurrierender Zugriffe zum Einsatz kommen. Häufig werden diese Strukturen zur Sperrsynchronisation von Prozessen und Ressourcen auch als Mutex (mutually exclusive) bezeichnet (Dijkstra, 1965). Der Einsatz dieser Synchronisationsmechanismen ist zwar vergleichsweise einfach

umzusetzen, muss jedoch bei der in Echtzeitbetriebssystemen anzutreffenden hardwarenahen Programmierung unbedingt beachtet werden.

5.2.10 Inter-Task-Kommunikation

Die Inter-Prozess- oder auch Inter-Task-Kommunikation spielt für den Datenaustausch und die Parameterübergabe zwischen unterschiedlichen Tasks eine wesentliche Rolle. Hierunter fällt nicht nur die Kommunikation zwischen den einzelnen Tasks des Echtzeitbetriebssystems, sondern auch die Kommunikation zwischen dem Echtzeitbetriebssystem auf der einen und einem extern angeschlossenen Host-System auf der anderen Seite. Als Beispiel kann die unter RT-Linux realisierte Kommunikation zwischen dem Echtzeitbetriebssystem und dem innerhalb einer Echtzeittask laufenden Gastsystem genannt werden (Abbott, 2003).

Sowohl Kommunikationsaufgaben als auch der Datenaustausch zwischen zwei Tasks desselben Betriebssystems werden vorwiegend durch zwei Mechanismen umgesetzt:

- Nutzung gemeinsamen Speichers
- Versendung von Nachrichten

Die Kommunikation über gemeinsamen Speicher kann entweder durch einen für alle Tasks adressierbaren Bereich des Hauptspeichers oder durch globale Variablen erfolgen. Der Schutz des Speicherbereiches vor konkurrierenden Zugriffen erfolgt wie in Kapitel 5.2.9 beschrieben über Semaphore. Diese Methode ist vergleichsweise schnell, da Variablen oder Speicherbereiche direkt aus der Task heraus angesprochen werden können. Ein Beispiel für die Kommunikation über gemeinsamen Speicher ist die Nutzung des Parameterbereiches im Betriebssystem Sorcus-OSX (Kapitel 8.3.2). Die Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass alle kommunizierenden Tasks auf demselben Prozessor laufen.

Demgegenüber kann die Kommunikation über Nachrichten auch zwischen Tasks stattfinden, die auf unterschiedlichen Systemen ausgeführt werden. Ein solcher Fall liegt vor, wenn Tasks eines Echtzeitsystems mit ihrem jeweiligen Host-System kommunizieren, um auf ein dort laufendes User-Interface oder dessen Datenspeicher zuzugreifen. Da die beteiligten Tasks und Prozesse auf räumlich verteilten Systemen ablaufen können, sind hierfür Funktionen des Betriebssystems notwendig. Nachteilig wirken sich hier der durch den Aufruf der Funktionen bedingte Overhead sowie die durch das verwendete Bussystem bedingten Latenzzeiten aus. Die nachrichtengesteuerte Kommunikation ist somit nur bedingt echtzeitfähig.

Eine praktische Umsetzung der Kommunikation über Nachrichten stellen sogenannte „Remote-Procedure-Calls“ (RPC) dar, die in den meisten modernen Betriebssystemen implementiert sind. Unter Sorcus-OSX (Kapitel 5.3.3) werden die als „Service-Requests“ (SRQ) bezeichneten RPC von speziellen Echtzeittasks stellvertretend ausgeführt, deren Aufrufe direkt durch das Betriebssystem verwaltet werden. Versand und Empfang von Nachrichten erfolgen hierbei mit Hilfe von Bibliotheksfunktionen, um laufende Tasks zu entlasten.

5.3 Ausgewählte Systeme

5.3.1 Weitere Hersteller

Echtzeitfähige Systeme werden für Zwecke der Messung, Steuerung und Regelung in verschiedenen technischen Fachdisziplinen wie dem Maschinen- und Anlagenbau, dem Bauingenieurwesen sowie der Geodäsie benötigt. Aufgrund des hohen Verbreitungsgrades und der großen Anzahl an Herstellern kann an dieser Stelle kein abschließender Überblick über die Marktsituation gegeben werden. Es ist jedoch festzustellen, dass die verfügbaren Messsysteme zum überwiegenden Teil auf spezielle Aufgabenstellungen zugeschnitten sind, was sich in einer eingeschränkten Auswahl an Schnittstellen, Datenraten oder unterstützten Signaltypen bemerkbar macht.

Im Hinblick auf die bestmögliche Integration in das zu entwickelnde Messsystem ist der Fokus neben den genannten Auswahlkriterien für die Messhardware auch auf das Angebot an unterstützten Betriebssystemen zu setzen. Trotz der grundsätzlichen Möglichkeit, die auf Linux-Basis verfügbaren Betriebssysteme an verschiedene Hardwareumgebungen anzupassen, sollen im Folgenden nur Hardwarehersteller in die engere Wahl gezogen werden, die ein eigenes oder bereits an die Hardware angepasstes Echtzeitbetriebssystem anbieten. Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über ausgewählte Hersteller echtzeitfähiger Messhardware.

Anbieter	RTOS	Bus
ADLINK Technology Inc.	LabVIEW	PXI, PCIe
Goldammer GmbH	LabVIEW	PCI
IO Tech Inc.	LabVIEW	PCI
Keithley Instruments Inc.	k.A.	PXI
Meilhaus Electronic	LabVIEW, QNX, VxWorks	PXI, PCI
Microstar Laboratories	LabVIEW, DAPL	k.A.
National Instruments	LabVIEW, QNX, VxWorks, RTX, RTAI	PCI, PXI, cPCI
Newport Electronics GmbH	LabVIEW	PCI
Rohde & Schwarz	k.A.	PXI
Sorcus GmbH	OsX	X-Bus

k.A.: Keine Angabe verfügbar

Tabelle 5.3: Hersteller echtzeitfähiger Messhardware

Unter Berücksichtigung weiterer Parameter wie Systemleistung, Flexibilität, Robustheit und Preis kann die verbleibende Auswahl weiter verringert werden. Aus diesem Grund sollen im Folgenden die Produkte der beiden Firmen National Instruments und Sorcus GmbH im Rahmen eines Systemvergleichs auf die Verwendbarkeit in der vorliegenden Entwicklung untersucht werden. Beide Firmen besitzen Produktlinien im Bereich der embedded-Systeme mit einer großen Anzahl verschiedener Schnittstellen, vertreiben eigene oder angepasste Echtzeitsysteme und bieten direkten Herstellersupport.

5.3.2 National Instruments

Die Firma National Instruments (NI) ist einer der weltweit führenden Anbieter von Mess- und Steuertechnik. Die angebotenen Lösungen umfassen nicht nur Embedded-Systeme, sondern auch Module zur Datenerfassung an standardisierten PC-Schnittstellen. Hierzu sind Datenerfassungskarten und Module für folgende Schnittstellen und Bussysteme verfügbar:

- PCI (Peripheral Component Interconnect)
- PXI (PCI eXtensions for Instrumentation)
- Firewire (IEEE 1394)
- USB
- ISA
- PCMCIA
- CompactFlash

Die echtzeitfähigen Trägerplattformen können mit Hilfe von Modulen oder Steckkarten um Schnittstellen zur Datenerfassung erweitert werden (Tabelle 5.4). Für Industrieumgebungen bietet NI die Modellreihen CompactRIO, Compact Vision System und Compact FieldPoint an, die sich durch große Robustheit, Mobilität, flexible Programmierung sowie durch eine hohe Zuverlässigkeit auszeichnen. Demgegenüber sind die PXI- und PCI-Modelle vornehmlich auf Laborumgebungen ausgerichtet, in denen maximale Leistung und eine große Auswahl an I/O-Modulen gewünscht sind. Das PXI-Format ist auch unter dem Begriff compact PCI (cPCI) bekannt. Es wurde ursprünglich von NI entwickelt, wird inzwischen aber von einer großen Zahl von Fremdherstellern als Quasi-Standard unterstützt.

PXI-Systeme stellen die „high-end“ Lösung von National Instruments für alle deterministischen Mess-, Steuer- und Regelaufgaben dar. Sie bestehen aus einem PXI Chassis zur Aufnahme eines Controllers und standardmäßig vier, sechs oder acht I/O-Modulen (Abbildung 5.9). Neben sehr hohen Datenraten bieten PXI-Systeme auch einen sogenannten PXI-Trigger-Bus zur hochgenauen Synchronisierung mehrerer PXI-Datenmodule. Hiermit kann ein deterministisches Antwortverhalten des gesamten Systems hinsichtlich externer Ereignisse bei möglichen Taktzeiten im Bereich weniger Millisekunden gewährleistet werden (National Instruments, 2004).

Der Controller dient in erster Linie zur Steuerung der gesamten Datenerfassungshardware sowie zur Kommunikation mit dem Host-System und besteht aus Standard PC Komponenten. Somit können neben dem standardmäßig verwendeten Echtzeitbetriebssystem PharLap OS von Citrix auch Betriebssysteme

Systemparameter	PXI RT-System	PCI Desktop PC	Compact RIO	Compact FieldPoint
Systemtyp	stand-alone	stand-alone	embedded	embedded
Systemleistung				
Antwortverhalten	+	o	+	-
Timing/Trigger/Sync	+	o	+	-
Prozessorleistung	o	+	o	-
Technische Daten				
Anzahl Module	4/6/8/14/18	n.a.	4/8	4/8
Stromversorgung	diverse	220 V (DC)	11-30 V (DC)	11-30 V (DC)
Leistungsaufnahme	> 145 W	> 200 W	17-20 W	< 15 W

+: Am Besten geeignet o: Gut Geeignet -: Geeignet

Tabelle 5.4: Echtzeitfähige Trägersysteme von NI (National Instruments, 2007b)

anderer Anbieter wie Windows XP in Verbindung mit der Echtzeiterweiterung RTX betrieben werden, bei der das Host System parallel zum RT-System auf der Echtzeit-Plattform läuft.

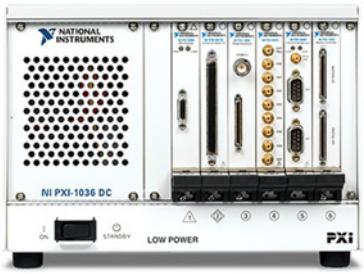


Abbildung 5.9: NI PXI Chassis (National Instruments, 2007a)

Abbildung 5.10: NI PXI Controller (National Instruments, 2007a)

Sowohl PXI- als auch PCI-Systeme erfüllen die gestellten Anforderungen in Bezug auf Flexibilität der möglichen Schnittstellen, Genauigkeit der Synchronisierung und Skalierbarkeit in vollem Umfang. Die von der Anzahl der Module und dem Modultyp abhängige Leistungsaufnahme des Trägersystems ist jedoch vergleichsweise hoch und erschwert einen Einsatz in Mobile-Mapping-Systemen deutlich.

Demgegenüber bietet die Compact FieldPoint-Serie (Abbildung 5.11) zwar eine geringere Systemleistung hinsichtlich Timing, Synchronisierung und Prozessorgeschwindigkeit, ist jedoch prinzipiell ebenfalls echtzeitfähig. Für die Datenerfassung stehen unter anderem A/D-, D/A-, Digital I/O- und Zählmodule zur Verfügung. Als Besonderheit dieser Systeme ist die vordefinierte Datenrate der I/O-Module zu nennen, die nicht durch den Anwender variiert werden kann. National Instruments empfiehlt den Einsatz dieses System in Anwendungen, in denen Datenraten von bis zu 200 Hz benötigt werden. Obwohl eine Quantifizierung der möglichen Latenzzeiten aus dieser Größe nicht abgeleitet werden kann, ist dennoch ersichtlich, dass harte sowie feste Echtzeitanforderungen nicht uneingeschränkt gewährleistet werden können.

Als robuste und leistungsfähige Alternative zu den echtzeitfähigen PXI-Systemen bietet National Instruments die CompactRIO-Modellreihe mit rekonfigurierbarem Field Programmable Gate Array (FPGA) an (Abbildung 5.12). Der FPGA-Baustein sorgt innerhalb des Chassis für den frei programmierbaren Zugriff auf alle I/O-Module des Systems mit einer Auflösung von 25 ns (National Instruments, 2006). Der Vorteil von FPGA gegenüber Integrierten Schaltkreisen (IC) liegt vor allem in der Möglichkeit, die Programmlogik erst vor Ort auf den Baustein zu übertragen und jederzeit ändern zu können. Hierdurch lassen sich unterschiedliche Aufgaben der Datenerfassung äußerst flexibel lösen.

CompactRIO-Systeme sind verglichen mit PXI- und PCI-Hardware robuster, lassen sich modular erweitern und eignen sich gut für den mobilen Einsatz im Stand-alone-Betrieb. Sie bestehen aus einem Embedded-Controller und bis zu acht Datenerfassungsmodulen, die während des laufenden Betriebes austauschbar sind. Ein vollständig mit Modulen und Controller ausgestattetes CompactRIO-System be-

Abbildung 5.11: NI Compact FieldPoint
(National Instruments, 2007a)

Abbildung 5.12: NI CompactRIO
(National Instruments, 2007a)

nötigt eine vergleichsweise geringe Leistungsaufnahme von 17 W bis 20 W.

Neben serieller und Ethernet-Schnittstelle besitzen die CompactRIO-Controller zudem einen USB-Host-Anschluss, über den externe Speichermedien wie USB-Festplatten für die Datensicherung angeschlossen werden können. Insbesondere die Möglichkeit, Daten mittels USB-Host-Schnittstelle während der Messung auf externen Speichermedien abzulegen, ist für Mobile-Mapping-Systeme mit hohem Datenvolumen ideal. Hochfrequente Messdaten können während des mobilen Betriebes außerhalb des Echtzeitrechners gespeichert werden und belasten somit die Systemressourcen des Echtzeitsystems nicht.

System	PXI	PCI	cRIO	cFP	Bemerkung
PharLap	•	•	•	•	Standard RTOS für LabVIEW RT
RTX	•	•			Realtime Extensions für Windows XP
RTAI Linux		•			
QNX		•			
VxWorks		•	•		Nur für MPC-Controller (PowerPC)

cRIO: CompactRIO; cFP: Compact FieldPoint

Tabelle 5.5: Echtzeitbetriebssysteme für NI-Hardware

Zur Softwareentwicklung bietet NI standardmäßig die grafische Entwicklungsumgebung LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) an. Auch hierbei wird die in Abbildung 5.1 dargestellte Trennung zwischen Anwendungsentwicklung und Datenerfassung vollzogen. So wird das Host-System zur Entwicklung und Kompilierung der Mess- und Erfassungssoftware sowie zur Speicherung der Daten genutzt. Die zeitkritische Datenerfassung wird mit den in LabVIEW entwickelten Programmen umgesetzt, die in der Regel auf dem angeschlossenen Embedded-System unter dem Echtzeitbetriebssystem PharLap ausgeführt werden. Daneben sind auch eine Reihe weiterer RTOS für die verschiedenen Hardwareplattformen von NI verfügbar, die in Tabelle 5.5 aufgeführt sind.

Der Vorteil von LabVIEW liegt in der Möglichkeit, automatisierte Mess- und Erfassungsvorgänge ohne Kenntnis einer Hochsprache über eine grafische Entwicklungsumgebung zu programmieren. Die hierdurch ermöglichte Trennung von Datenfluss und Programmcode wirkt sich insbesondere vorteilhaft bei der Portierung auf unterschiedliche Zielplattformen aus, da die Anpassung der Erfassungsprogramme an Hardware und Echtzeitbetriebssystem der Entwicklungsumgebung überlassen wird. Zudem stellte LabVIEW eine große Anzahl vordefinierter Funktionsbibliotheken zur Ansteuerung verschiedenster Schnittstellen zur Verfügung.

Charakteristisch für die Programmierung mit LabVIEW sind die sogenannten virtuellen Instrumente (VI), welche die eigentliche Programmfunktionalität beinhalten und vergleichbar mit Prozeduren oder Funktionen in Hochsprachen sind. LabVIEW-Programme bestehen allgemein aus dem sogenannten „Front-Panel“ und anwenderspezifischen Blockdiagrammen. Das Front-Panel dient als grafische Benutzeroberfläche für spätere Anwendungen oder als Man-Machine-Interface (MMI) bei Aufgaben in der Maschinensteuerung. Der eigentliche Datenfluss wird mit Hilfe von Blockdiagrammen abgebildet, in denen der ausführbare Programmcode zwar implizit enthalten ist, vom Systementwickler jedoch nicht eingesehen werden kann.

Mit Hilfe einer solchen Diagrammsteuerung kann die Anwendungsentwicklung sehr abstrahiert und teilweise automatisiert ablaufen, wodurch verschiedene Multitasking-Anwendungen ohne tiefere Kenntnis von Echtzeitbetriebssystemen erstellt werden können.

Die sogenannte „Real-Time-Engine“ von LabVIEW RT ist für die Ausführung der virtuellen Instrumente auf einem der in Tabelle 5.5 aufgeführten Echtzeitbetriebssysteme zuständig (Abbildung 5.13). Standardmäßig wird zur Ausführung von LabVIEW RT das Echtzeitbetriebssystem PharLap der Firma Ardence verwendet. Insofern stellt LabVIEW RT kein Echtzeitbetriebssystem im eigentlichen Sinne dar, sondern vielmehr eine Entwicklungs- und Laufzeitumgebung für die auf der Zielplattform laufenden VI. Bei Multitasking-Anwendungen werden hierzu mehrere Instanzen von LabVIEW RT auf dem Echtzeitbetriebssystem installiert, wobei die Anzahl der Instanzen von der Anwendung selbst sowie der Anzahl der installierten VI abhängig ist.

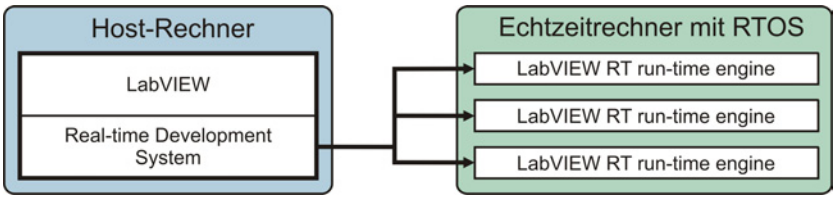


Abbildung 5.13: Übertragung virtueller Instrumente bei LabVIEW RT

Zusätzlich zu den in LabVIEW implementierten Routinen können auch eigene C/C++ Bibliotheken mit Hilfe des Code Interface Nodes (CIN) eingebunden werden (Beyon, 2001). Hierdurch lassen sich bereits vorhandene Codebibliotheken zur Auswertung und Verarbeitung der Messdaten nutzen. Kempf und Kuhn (1999) zeigen am Beispiel einer unter Linux entwickelten LabVIEW-Anwendung, wie mit Hilfe von CIN fremde Gerätetreiber und somit auch Hardware von Drittanbietern in beliebige LabVIEW-Programme eingebunden werden können.

LabVIEW RT verwendet in Kombination mit PharLap einen preemptiven Scheduling-Algorithmus, der sowohl Time-Slice-Scheduling als auch Fixed-Priority-Mechanismen beherrscht. Zur Entwurfszeit erfolgt eine Einteilung aller Tasks in eine der fünf Kategorien Standard, Instrument I/O, Data Acquisition (DAQ) sowie zwei benutzerdefinierte Kategorien. Bei dieser Einteilung ist zu beachten, dass der sequentielle Aufruf zweier Tasks aus unterschiedlichen Kategorien immer einen Kontextwechsel auf Betriebssystemebene erfordert. Bei häufigen Kontextwechseln kann ein signifikanter Anstieg der Systemlast erfolgen, durch den die maximale Ausführungsgeschwindigkeit dementsprechend sinkt. Aus diesem Grund sollten alle Tasks bei zeitkritischen Anwendungen in wenigen Kategorien zusammengefasst werden.

Innerhalb dieser Kategorien können einer Task die fünf Prioritätsstufen time-critical, high, above normal, normal und background zugewiesen werden. Abbildung 5.14 verdeutlicht beispielhaft die beiden vorhandenen Scheduling-Verfahren anhand einer Prioritätsmatrix (Johnson und Jennings, 2006).

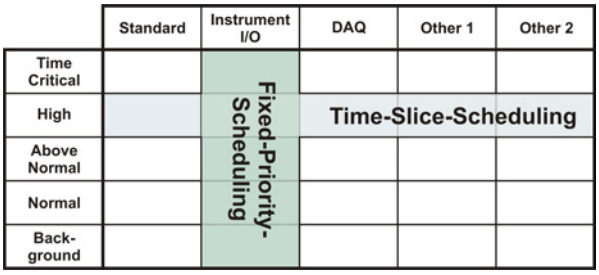


Abbildung 5.14: Prioritätsmatrix des LabVIEW RT-Schedulers

Standardmäßig erfolgt die Zuteilung von Rechenzeit mit Hilfe des preemptiven Time-Slice-Verfahrens, sofern ablaufwillige Tasks gleiche Prioritäten besitzen. Für den Fall, dass unterschiedlich priorisierte Tasks die verfügbare Rechenzeit beanspruchen, erfolgt eine Zuteilung entsprechend dem preemptiven Fixed-Priority-Scheduling unter Berücksichtigung der vom Anwender vorab definierten Prioritäten (Johnson und Jennings, 2006). Die Kombination dieser einfachen Scheduling-Verfahren erleichtert die Verwaltung der Threadsteuerung für den Benutzer und ist selbst für die Verwaltung mittelgroßer Tasksets geeignet. Komplexere Scheduling-Verfahren können darüber hinaus durch den Einsatz weiterer Echtzeitbetriebssysteme genutzt werden, die in Tabelle 5.5 aufgeführt sind.

5.3.3 Sorcus GmbH

Die Sorcus Computer GmbH aus Heidelberg bietet verschiedene echtzeitfähige Trägerplattformen zur Messdatenerfassung auf Grundlage des sogenannten „X-Bus“-Systems an. Das X-Bus-System stellt eine Eigenentwicklung von Sorcus dar und verwendet kleine Steckmodule zur Datenerfassung, die auf einer der verschiedenen Trägerplattformen zum Einsatz kommen können.

Abgesehen von der Trägerkarte MAX6-PCI, die über die PCI-Schnittstelle in ein PC-System eingebunden werden kann, sind alle Plattformen auf den Betrieb als Stand-alone-Lösung oder Embedded-System ausgerichtet (Tabelle 5.6). Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Anzahl der gleichzeitig verwendbaren Datenerfassungsmodule, die über die proprietäre X-Bus Schnittstelle integriert werden können.

Trägersystem	**Anzahl Module** (Daten/CPU)	**Anbindung**	**Stromversorgung**
MAX6pci	6	PCI Slot	PCI-Schnittstelle
CANbox	2 (1/1)	Stand-alone/ Embedded	6-60 V (DC)
MAX5dip	5 (3/2)	Embedded	18.6 - 36.0 V
MAX8dip	8 (6/2)	Stand-alone/ Embedded	18.6 - 36.0 V
MAX2box	2 (1/1)	Stand-alone/ Embedded	6-60 V (DC) / USB

Tabelle 5.6: Übersicht der Sorcus Trägersysteme

Die verfügbaren Trägerplattformen benötigen für den Echtzeitbetrieb mindestens ein CPU-Modul, können bei hohen Anforderungen an die Verarbeitungsgeschwindigkeit jedoch auch als Mehrprozessorsysteme betrieben werden.

Die MAX6pci ist eine PCI-Steckkarte für bis zu sechs Datenerfassungsmodule und ausschließlich auf den Betrieb in einem PC ausgelegt. Aus den bereits in Kapitel 5.3.2 dargelegten Gründen ist sie für den Einsatz in Mobile-Mapping-Systemen wenig geeignet.

Die weiteren in Tabelle 5.6 aufgeführten Trägerplattformen besitzen eine kompakte Bauform und können sowohl dezentral an einem PC als auch in Form von Embedded- oder Stand-alone-Systemen als eigenständige Datenerfassungseinheiten ohne Host-Rechner betrieben werden.

Die Systeme MAX5dip und MAX8dip bieten fünf (MAX5dip) beziehungsweise acht (MAX8dip) Steckplätze nach X-Bus Standard, von denen jeweils zwei für CPU-Module reserviert sind. Der Anschluss der Sensorik erfolgt über einen 128-poligen Klemmenblock, auf dem 40 Anschlussklemmen für jeden Modulsteckplatz zur Verfügung stehen. Zur Kommunikation mit einem Host-PC oder externer Peripherie ist eine 9-polige Host-Schnittstelle vorhanden, auf die mittels Ethernet, Profibus, RS-232/422 oder CAN-Bus zugegriffen werden kann. Die MAX5dip bietet im Gegensatz zur MAX8dip keine USB-Host-Schnittstelle zum Anschluss externer Speichermedien, so dass zur Datenspeicherung nur ein 8 MByte großer interner Puffer zur Zwischenspeicherung der Daten genutzt werden kann. Somit kann die MAX5dip nur als Embedded-Lösung zusammen mit einem Host-Rechner betrieben werden.

Abbildung 5.15: MAX5dip
(Sorcus GmbH, 2006)

Abbildung 5.16: MAX6pci
(Sorcus GmbH, 2006)

Das CANbox-System ist vornehmlich auf den Betrieb in Kraftfahrzeugen ausgerichtet, bei dem die Daten der über den CAN-Bus angebundenen Fahrzeugsensoren erfasst werden sollen. Hierzu kommt neben einem CPU- auch ein CAN-Bus Modul zum Einsatz, das über zwei getrennte CAN-Bus-Schnittstellen verfügt. Die Kommunikation kann wahlweise über Ethernet, WLAN, Bluetooth oder eine optionale

Abbildung 5.17: MAX2box
(Sorcus GmbH, 2006)

Abbildung 5.18: CANbox
(Sorcus GmbH, 2006)

USB-Schnittstelle mit externer Peripherie erfolgen. Hierdurch lässt sich die CANbox auch als CAN-auf-Ethernet- oder CAN-auf-WLAN-Umsetzer verwenden. Die CANbox erlaubt Betriebsspannungen zwischen 6 und 60 V.

Die kleinste Trägerplattform ist die MAX2box, auf der neben einem CPU-Modul noch ein zusätzliches MAX-Modul für Datenerfassungsaufgaben Platz findet. Die CPU bietet bereits eine Ethernet- und eine RS-232/422-Schnittstelle sowie einen USB-Host und als Besonderheit einen vollwertigen Compact-Flash-Steckplatz. Auf diesem können sowohl Speichermedien, als auch optionale WLAN- oder Bluetooth-Module zur Erweiterung der Kommunikationmöglichkeiten eingesetzt werden. Die MAX2box kann mit Betriebsspannungen von 6 V bis 60 V betrieben werden. Alternativ ist auch eine Spannungsversorgung über die USB-Schnittstelle möglich.

Aufgrund der geringen Anzahl an Modulsteckplätzen kommen die CANbox sowie die MAX2box für den Einsatz in Mobile-Mapping-Systemen trotz eines hohen Maßes an Mobilität und Robustheit nicht in Frage.

Die Ausführung von Anwendungsprogrammen zur Datenerfassung kann sowohl auf der Max-CPU des Trägersystems als auch auf einem optional angeschlossenen Host-PC stattfinden. Der für den Zugriff auf die Module und deren Schnittstellen zuständige Quellcode ist durch die Verwendung von Bibliotheksfunktionen unabhängig vom Betriebssystem.

Die Echtzeitfähigkeit von Programmen kann hingegen nur gewährleistet werden, wenn das Trägersystem mit einer eigenen CPU bestückt ist und somit als Embedded-System genutzt werden kann (Abbildung 5.1). Nur hierdurch kann der Zugriff auf Schnittstellen und die Reaktion auf Ereignisse wie Interrupts oder Timeraufrufe mit der erforderlichen Geschwindigkeit erfolgen.

Sorcus bietet für seine Trägersysteme mit eigenem CPU-Modul das selbst entwickelte Echtzeitbetriebssystem OsX an, das als Mikrokernel-System ohne grafische Oberfläche realisiert ist. Das ROM des CPU-Moduls wird hierbei zur dauerhaften Speicherung von zwei OsX-Versionen genutzt. Eine Version mit minimalem Funktionsumfang wird nach jedem Reset der Trägerkarte aktiviert und vollständig im ROM der Max-CPU ausgeführt. Sie kann zum einen für das Debugging installierter Anwendungen genutzt werden, dient aber in der Hauptsache dazu, das reguläre Betriebssystem ins RAM des CPU-Moduls zu kopieren und dort zu booten. Hierdurch wird ein vollautomatischer Start des gesamten Systems nach Anlegen der Betriebsspannung ermöglicht.

OsX kommuniziert über Makrobefehle und vordefinierte Bibliotheksfunktionen mit einem optional angeschlossenen Host-PC und den installierten Echtzeitprogrammen (Kapitel 8.3.3). Die Datenerfassung erfolgt mit Hilfe anwenderspezifischer Programme, die in den Sprachen Borland Pascal, Borland C++ oder Assembler geschrieben werden können. Die Funktion der einzelnen Programme ist hierbei nicht bloß auf die reine Erfassung von Daten über die Schnittstellen der verschiedenen Max-Module beschränkt, sondern kann sich auch mit der Systempflege, der Speicherung und Übertragung von Daten oder Steuer- und Regelaufgaben befassen.

Zur Taskverwaltung kommen unter OsX sowohl das Fixed-Priority- in preemptiver und nicht-preemptiver Form als auch das FIFO-Scheduling zum Einsatz. Zur Festlegung der Prioritäten sind alle Tasks bei ihrer Installation einer der drei folgenden Klassen zuzuordnen:

1. Interrupt (II-Task)
2. Timer (TI-Task)

3. Non-Interrupt (NI-Task)

Hierbei ist zu beachten, dass eine solche Einordnung nicht streng an die Art der Ereignissteuerung jeder Task gebunden ist. So sind auch einzelne Timerbausteine der Sorcus-Hardware in der Lage, Interrupts auszulösen und Tasks in äquidistanten Zeitintervallen zu aktivieren.

Diese Einordnung führt bereits zu einer übergeordneten Priorisierung, auf deren Grundlage die Tasks verschiedener Klassen gegenseitig durch preemptives Fixed-Priority-Scheduling verwaltet werden. Hierbei besitzen II-Tasks Vorrang gegenüber TI-Tasks, die wiederum den NI-Tasks bei der Ausführung vorgezogen werden.

Treffen hingegen ablaufwillige Tasks auf laufende derselben Klasse, so werden unterschiedliche Scheduling-Strategien verwendet. II-Tasks besitzen standardmäßig feste Prioritäten und verhalten sich gegenüber anderen Tasks immer preemptiv, sofern sie als höherwertig deklariert wurden. TI-Tasks besitzen ebenfalls feste Prioritäten, die innerhalb ihrer Klasse jedoch ohne Preemption angewendet werden. Im Unterschied zu Interrupt-gesteuerten Tasks können die Prioritäten während der Laufzeit vom Anwender verändert werden und sind somit quasi-dynamisch. NI-Tasks sind dagegen in jedem Fall nicht-preemptiv und werden durch FIFO-Scheduling gesteuert. Ihre Aktivierung kann jedoch ähnlich wie TI-Tasks innerhalb einer Warteschlange bevorzugt und somit quasi-dynamisch geschehen.

Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten zur Kombination von Priorisierungs- und Schedulingaufgaben ergeben sich die in Abbildung 5.19 dargestellten Optionen zur Klassifizierung unterschiedlicher Tasks.

		II-Task	TI-Task	NI-Task
Unterschiedliche Klassen	Preemption	Ja	Ja	Nein
	Priorisierung	statisch	statisch	statisch
	Scheduler	Fixed-Priority	Fixed-Priority	Fixed-Priority
Gleiche Klasse	Preemption	Ja	Nein	Nein
	Priorisierung	statisch	dynamisch	dynamisch
	Scheduler	Fixed-Priority	Fixed-Priority	FIFO

Abbildung 5.19: Scheduling-Verfahren unter OsX

5.3.4 Zwischenfazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass National Instruments eine äußerst breite Produktpalette zur Messdatenerfassung im Hinblick auf Ausstattung, Leistung und Funktionsvielfalt anbietet. Insbesondere die CompactRIO-Serie ist für den feldtauglichen Einsatz in mobilen Datenerfassungssystemen durch ihre geringe Stromaufnahme, die robuste Bauweise und die hohe Systemleistung gut geeignet.

Bei allen Hardwarelösungen von NI ist jedoch zu berücksichtigen, dass die mit LabVIEW und LabVIEW RT erstellten virtuellen Instrumente nicht in eine quelltextbasierte Struktur überführt werden können und mit Hilfe einer proprietären Entwicklungsumgebung erstellt werden müssen. Diese Lösung ermöglicht auf der einen Seite die schnelle und einfache Entwicklung von echtzeitfähigen Programmen, ist jedoch auf der anderen Seite mit vergleichsweise hohen Lizenzgebühren für den Einsatz und die Weitergabe dieser Software verbunden. Zudem ist eine Portierung der entwickelten Software auf Plattformen fremder Hersteller nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren.

Demgegenüber erfüllt die Firma Sorcus mit den sehr kompakten Trägerplattformen MAX5dip und MAX8dip sowie einer großen Zahl an Datenerfassungsmodulen die gestellten Anforderungen bezüglich Flexibilität, Modularität und Mobilität in vollem Umfang. Zudem kann die Skalierbarkeit durch Verwendung eines zweiten CPU-Moduls im Rahmen der benötigten Systemleistung als gesichert angesehen werden.

Insbesondere der vergleichsweise niedrige Systempreis und das lizenzfreie Echtzeitbetriebssystem OsX in Verbindung mit einer breiten Auswahl an Schnittstellenmodulen prädestiniert das X-Max-System für den Einsatz im vorliegenden Konzept.

6 Das Messsystem

6.1 Anforderungen an Sensorik und Messhardware

Nachdem in den Kapiteln zwei bis fünf der aktuelle Stand der Forschung beschrieben sowie verschiedene theoretischen Grundlagen zur Positionsbestimmung, Sensorik und Messdatenerfassung im kinematischen Umfeld erarbeitet wurden, soll mit Beginn dieses Kapitels der Übergang zur konzeptionellen Realisierung eines Prototypen vollzogen werden (vgl. Abbildung 1.4, Seite 13). Das zu entwickelnde System soll geeignet sein, die kinematische Objekterfassung mit Hilfe eines profilmessenden terrestrischen Laserscanners unter Einhaltung der in Tabelle 1.1 definierten Rahmenbedingungen durchzuführen. Hierzu sind für jeden Scanpunkt eines Profils das räumliche Koordinatentripel sowie die drei Orientierungsparameter für den Ursprung des Scannersystems in einem übergeordneten Koordinatenrahmen zu bestimmen.

Zur Messdatenerfassung sollen vornehmlich geodätische Standardsensoren zum Einsatz kommen, die Verwendung eines echtzeitfähigen Messsystems ist zu diskutieren. Die zur Umsetzung der Aufgabenstellung notwendige Messhardware kann entsprechend Kapitel 1.2 in vier zentrale Problembereiche „Trajektorienbestimmung“, „Orientierungsbestimmung“, „Synchronisierung“ und „Objekterfassung“ untergliedert werden. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über Hardware und Sensoren des System sowie ihren Beitrag zur Bestimmung der Zustandsparameter.

Parameter	**GPS-Empfänger**	**Neigungs-messer**	**Laser-scanner**	**Echtzeit-rechner**
Trajektorienbestimmung				
Raumkoordinaten [X,Y,Z]	•	-	-	-
Orientierungsbestimmung				
Rollwinkel Φ	-	•	-	-
Nickwinkel Θ	•	optional	-	-
Gierwinkel Ψ	•	-	-	-
Synchronisierung				
Zeitskala T_{Ref}	-	-	-	•
Objekterfassung				
Scanpunkt [x,y,z,Int]	-	-	•	-

Tabelle 6.1: Mindestkonfiguration des Messsystems

Die Bestimmung von Position und Orientierung hängt in diesem System stark von satellitengestützten Verfahren ab. Um das System auch in Konfigurationen mit nur einem GPS-Empfänger betreiben zu können, ist der Einsatz eines Inklinometers zur Ermittlung des Rollwinkels notwendig, wobei auch der Nickwinkel optional mit Hilfe von Inklinometermessungen ermittelt werden kann. Wie die in Kapitel 3.7 diskutierten Verfahren zur GPS-gestützten Bestimmung von Gier-, Nick- und Rollwinkel zeigen, ist es beim Einsatz mehrerer Empfänger zudem möglich, auf eine Winkelmessung mit Inklinometern vollständig zu verzichten.

Beim Einsatz unterschiedlicher Sensoren in kinematischen Messsystemen ist die gegenseitige Synchronisierung aller Daten, genauer gesagt die Referenzierung in einer einheitlichen Zeitskala, unverzichtbare Voraussetzung. Ein solcher Synchronisierungsvorgang wird nicht nur für bewegte Plattformen, sondern auch zur kinematischen Erfassung bewegter Objekte benötigt und gewährleistet, dass alle erfassten Messdaten auf identische Zeitpunkte bezogen werden können.

In der ingenieurgeodätischen Praxis werden häufig GPS-Empfänger aufgrund des hohen Genauigkeitsniveaus der GPS-Zeitskala für Synchronisierungszwecke verwendet, wobei sowohl die Aufzeichnung externer Signale über einen Trigger-Eingang („Event-Marker“) als auch die Ausgabe des hochgenauen PPS-Pulses durch den Empfänger möglich sind. Abbildung 6.1 zeigt drei Varianten am Beispiel der Synchronisation von Laserscanner und GPS-Empfänger, die auch von einigen am Markt verfügbaren Mobile-Mapping-Systemen verwendet werden. Da der Laserscanner die zentrale Komponente des Systems bildet, ist grundsätzlich zwischen einer Synchronisierung externer Sensoren durch den Scanner (Option A) und einer Synchronisierung der Scannerdaten außerhalb des Laserscanners (Optionen B und C) zu unterscheiden.

Bei der mit „A“ bezeichneten Option werden externe Sensorsignale in den Datenstrom des Scanners integriert und im Rahmen einer anschließenden Auswertung extrahiert. Sollen mehr als zwei Sensoren

gleichzeitig synchronisiert werden, sind für die Zusammenführung der Signale sogenannte „Multiplexer“ oder „Latch-Register“ (Möschwitzer und Lunze, 1988) erforderlich, mit deren Hilfe parallel auftretende Signale in einem seriellen Datenstrom verarbeitet werden können.

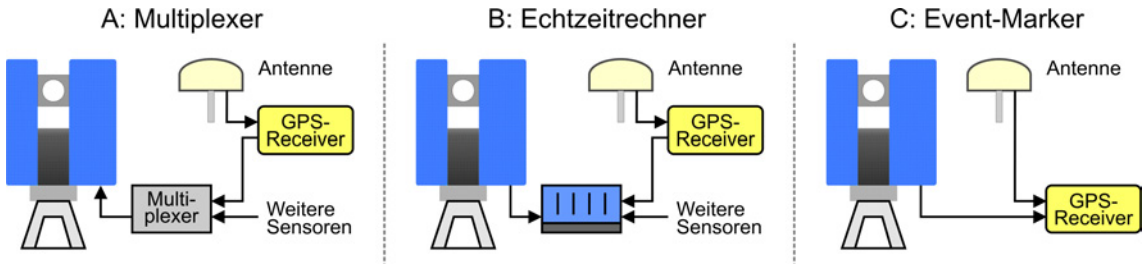


Abbildung 6.1: Optionen zur Synchronisierung von Sensordaten

Der wesentliche Nachteil dieser Variante besteht in der Notwendigkeit, einen Multiplexer zur gleichzeitigen Synchronisierung mehrerer Signalquellen zu verwenden. Zudem bezieht sich dieser Ansatz vornehmlich auf die Erfassung von digitalen Rechtecksignalen und weniger auf die Aufzeichnung analoger oder seriell-codierter digitaler Datenströme. Die Erfassung RS-232-codierter serieller Daten ist zwar grundsätzlich möglich, jedoch mit erhöhtem Aufwand verbunden. Vor dem Hintergrund, dass bei einer Systemerweiterung weitere hochfrequent messende Sensoren mit dem auch aus seriellen digitalen Daten bestehenden GPS-Zeitnormal zu synchronisieren sind, erscheint diese Variante aufgrund der weniger guten Skalierbarkeit unvorteilhaft. Als Beispiel einer praktischen Umsetzung ist der „Internal Sync Timer“ (Abbildung 4.9) der Firma Riegl zu nennen, der beispielsweise im GeoVAN-System zum Einsatz kommt (Alamús u. a., 2005).

Die Varianten B und C haben gemeinsam, dass die Synchronisierung der Daten außerhalb des Scanners geschieht. Bei Lösung C wird die bereits angesprochene „Event-Marker“-Option von GPS-Empfängern zur Referenzierung externer Rechtecksignale genutzt. Hierbei wird derjenige Zeitpunkt erfasst und im Datenstrom des Empfängers abgelegt, an dem die steigende Signalflanke eines anliegenden Rechtecksignals einen definierten Pegel überschreitet. Bei dieser Lösung besteht jedoch die generelle Einschränkung, dass schnittstellenbedingt ausschließlich Rechtecksignale genutzt werden können, da diese Event-Marker-Schnittstelle des Empfängers nicht in der Lage ist, RS-232-codierte digitale Daten mit vertretbarem Aufwand zu erfassen. Aus diesem Grund kommt eine solche Lösung für das vorliegende Problem nicht in Betracht.

Die größte Flexibilität hinsichtlich der Synchronisierbarkeit unterschiedlicher Sensortypen und Datenformate bietet Option B, bei der nicht nur die vom Scanner sowie GPS-Empfänger erzeugten Rechtecksignale, sondern auch zusätzliche Sensordaten in einem zentralen Echtzeitrechner erfasst und zeitlich referenziert werden können. Abhängig von den zur Verfügung stehenden Schnittstellenmodulen ist die Erfassung beliebiger Datenformate und Signaltypen problemlos möglich. Die Synchronisierung von Daten mit Hilfe echtzeitfähiger Messhardware erfordert auf der einen Seite höhere Investitionen in Messhardware und die Entwicklung spezieller Erfassungssoftware; auf der anderen Seite bietet diese Methode ein hohes Maß an Flexibilität und Skalierbarkeit sowie die Möglichkeit, den gesamten Prozess der Erfassung und Verarbeitung von Sensordaten aktiv zu beeinflussen. Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über die von verschiedenen Herstellern ermöglichten Optionen sowie deren Vor- und Nachteile.

	Option A: Interne Aufzeichnung im Scanner	**Option B Ausgabe über Schnittstelle**
Hersteller	Zoller+Fröhlich Riegl	Zoller+Fröhlich
Vorteil	Keine Zusatzhardware notwendig Datenverarbeitung durch Scanner	Flexibler, da gleichzeitige Synchronisation mehrerer Sensoren möglich, Komponentenkalibrierung möglich
Nachteil	Bei mehreren Sensoren Multiplexer notwendig	Kostenintensive Zusatzhardware notwendig

Tabelle 6.2: Vergleich der Synchronisierungsverfahren

Durch die Verwendung eines echtzeitfähigen Messrechners können jeder Signalquelle und dadurch auch jedem Sensor unterschiedliche Prioritäten entsprechend der Bedeutung für das Gesamtsystem zugeordnet werden. Eine solche Möglichkeit ist insbesondere für das vorliegende System interessant, da die Referenzierung von GPS- und Scannerdaten für die Genauigkeit des Gesamtsystems entscheidend ist.

Aufgrund der Vorteile, die sich durch den Einsatz eines echtzeitfähigen Messrechners eröffnen, soll die Synchronisierung der Sensordaten nach der in Abbildung 6.1 gezeigten Option B durchgeführt werden. Hierzu werden der PPS-Puls eines GPS-Empfängers, die Messwerte der Laserscanners sowie die Neigungsmessungen eines Inklinometers in der Zeitskala des Echtzeitrechners erfasst.

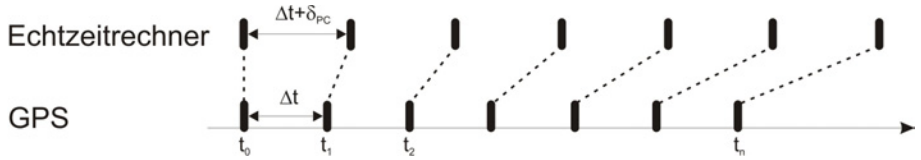


Abbildung 6.2: Drift der Uhr des Echtzeitrechners

Echtzeitrechner sind zwar in der Lage, hochfrequente Datensignale mit geringen Latenzzeiten und hoher zeitlicher Genauigkeit zu referenzieren, jedoch wird auch die Zeitskala dieser Systeme von Driften beeinflusst, die zu systematischen Abweichungen δ_{PC} führen (Abbildung 6.2). Der vom GPS-Empfänger zur Verfügung gestellte PPS-Puls kann somit neben der Referenzierung der Raumpositionen zusätzlich zur Stabilisierung der Systemuhr des Echtzeitrechners verwendet werden. Im Vorgriff auf die Kalibrierung der Echtzeituhr sei an dieser Stelle bemerkt, dass eine Nichtberücksichtigung dieser Driften zu signifikanten systematischen Abweichungen führen kann. Aus diesem Grund sollte die kontinuierliche Erfassung des PPS-Pulses mit höchster Priorität erfolgen.

Die Ermittlung der notwendigen Synchronisiergenauigkeit aller Sensoren bildet die Grundlage für die Auswahl der gesamten Messhardware und richtet sich nach der geforderten Standardabweichung eines Einzelpunktes im Objektraum. Ausgehend von der in Tabelle 1.1 geforderten Genauigkeit für die Punktbestimmung in der Ebene von $\sigma_{XY} = 20$ cm kann der Anteil der Synchronisierung am Genauigkeitsbudget ermittelt werden, das aus Gründen der Vereinfachung an dieser Stelle lediglich für den zweidimensionalen Fall angegeben werden soll. Es setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

$$\sigma_{XY} = \boldsymbol{f}(\sigma_{XY,Pos}, \sigma_{XY,Azimut}, \sigma_{XY,Sync}, \sigma_{XY,Scan}) \leq 20 \text{ cm} \tag{6.1}$$

Die Gesamtgenauigkeit soll dabei entsprechend den in Tabelle 6.3 genannten Anteilen der Einzelkomponenten gebildet werden. Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, dass der bei weitem höchste Abweichungsanteil der Bestimmung des Azimutes zugewiesen wird. Dies ist in erster Linie durch die Tatsache begründet, dass die GPS-Positionen, auf deren Grundlage die Ableitung der Azimute vorgenommen wird, mit einer Standardabweichung von bis zu 5 cm berücksichtigt werden. Eine solche Abweichung ist zwar für eine statische Positionierung im SAPOS-Netz vergleichsweise hoch, berücksichtigt jedoch schlechte Empfangsbedingungen sowie den Umstand, dass hierbei eine kinematische Einzelpunktpositionierung mit 10 Hz Abtastrate durchgeführt wird.

Komponente	**Genauigkeitsanteil**
Laserscan	3 cm
GPS-Position	5 cm
Azimutbestimmung	10 cm
Synchronisierung	2 cm
Summe	20 cm

Tabelle 6.3: Anteile am 2D-Genauigkeitsbudget der Objektpunkte

Die Standardabweichung der Scannerdaten, der Positionsbestimmung aus GPS-Beobachtungen sowie des daraus abgeleiteten Azimutes hängen von konstanten Parametern mit stochastischem Anteil ab. Demgegenüber wird der durch die Synchronisierung der Sensoren bedingte Betrag entscheidend von der Fahrtgeschwindigkeit des Wagens sowie vom Kurvenradius der Trajektorie bestimmt.

Im Gegensatz zur Geradeausfahrt, bei der die Unsicherheit der Objektpunktbestimmung eine Funktion in Abhängigkeit von der Fahrtgeschwindigkeit ist, vollzieht der Laserstrahl bei Kurvenfahrten eine tangentiale Schwenkbewegung. Je kleiner der Kurvenradius gewählt wird desto höher sind die tangentialen Geschwindigkeiten und desto größer ist die Auswirkung einer Synchronisierungenauigkeit auf die Punktbestimmung im Objektraum. Bezogen auf den Objektraum führen systematische Abweichungen der Referenzierung von Raumpositionen und Scannerdaten zu einem Zeitversatz, der dafür sorgt, dass den einzelnen Scanprofilen fehlerhafte Raumpositionen zugeordnet werden und die erstellte Punktwolke verzerrt wird.

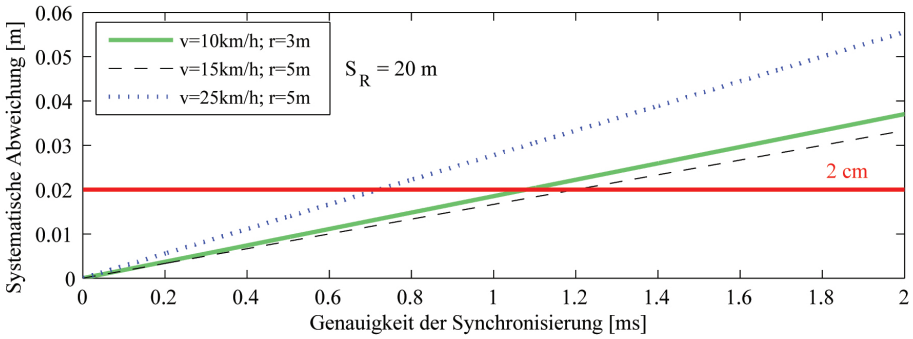


Abbildung 6.3: Auswirkung eines Synchronisierungsfehlers bei Kurvenfahrt

Zur Abschätzung der benötigten Synchronisiergenauigkeit sollen drei Szenarien mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Kurvenradien betrachtet werden, die auf Objektpunkte im Scanradius von $S_R = 20$ m bezogen sind (Abbildung 6.3). Wird für die maximal zulässige Abweichung in der Ebene ein Wert von $\sigma_{XY,Sync} = 2$ cm unterstellt, so ergeben sich aus Fahrtgeschwindigkeiten von 5, 10 und 15 km/h in Verbindung mit Kurvenradien von 3 und 5 m die in Tabelle 6.4 aufgeführten Synchronisiergenauigkeiten durch einen linearen Zusammenhang.

Szenario	**Geschwindigkeit v**	**Kurvenradius r**	**Synchronisiergenauigkeit**
1	10 km/h	3 m	1080 μs
2	15 km/h	5 m	1200 μs
3	25 km/h	5 m	720 μs

Tabelle 6.4: Erforderliche Synchronisiergenauigkeit bezogen auf $\sigma_{XY,Sync} = 2$ cm

Diese Abweichungen sind als Differenz zwischen den Erfassungszeitpunkten von GPS-Beobachtungen und Scannermessungen zu sehen, so dass die in Tabelle 6.4 genannten Abweichungen zu gleichen Teilen auf die Erfassungsvorgänge beider Signale zu verteilen sind. Bezogen auf die Terminierung in Echtzeitmesssystemen darf die maximale Ausführungszeit einer Task t_{max} bei $v = 25$ km/h und $r = 5$ m einen Wert von

$$t_{max} = 0.5 \cdot \sigma_{XY,Sync} = j_i + e_i + l_i = 360\ \mu\text{s} \tag{6.2}$$

nicht überschreiten. Durch Auswahl der geeigneten Messhardware ist somit sicherzustellen, dass der maximale Erfassungszeitraum eines Einzelsignals t_{max} bestehend aus Reaktionszeit j_i, Ausführungszeit e_i und Spielraum l_i der Task (Abbildung 5.6) einen Wert von 360 μs nicht überschreitet.

Da Neigungs- und Temperatursensoren ereignisbezogen erfasst werden, entsprechen die Anforderungen an die Synchronisierung der gewünschten Periodendauer. Dennoch sollte die Zeitreferenzierung der Messwerte direkt und ohne vorherige Pufferung der Rohdaten geschehen, um systematische Abweichungen zu vermeiden.

6.2 Begründung der Sensorauswahl

6.2.1 GPS

Da bei der vorliegenden Systementwicklung auf die Verwendung einer Inertialmesseinheit verzichtet wird, stellt die satellitengestützte Positionsbestimmung die zentrale Komponente zur Bestimmung von Fahrzeugtrajektorie und räumlicher Orientierung dar. Um die in Kapitel 3.2.4 diskutierten systematischen Abweichungen der Trajektorie, die durch einen Versatz zwischen Antenne und Fahrzeugnullpunkt entstehen, zu vermeiden, soll eine Positionsbestimmung mit GPS in zwei unterschiedlichen Konfigurationen umgesetzt werden.

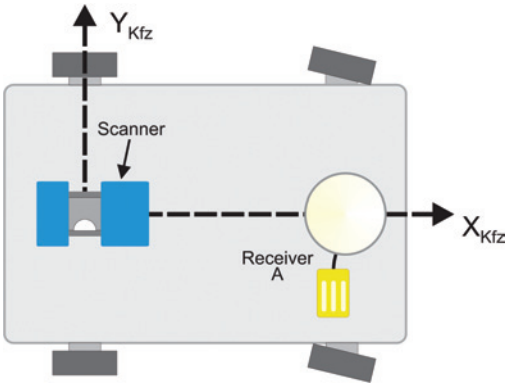


Abbildung 6.4: Konfiguration mit einem Empfänger

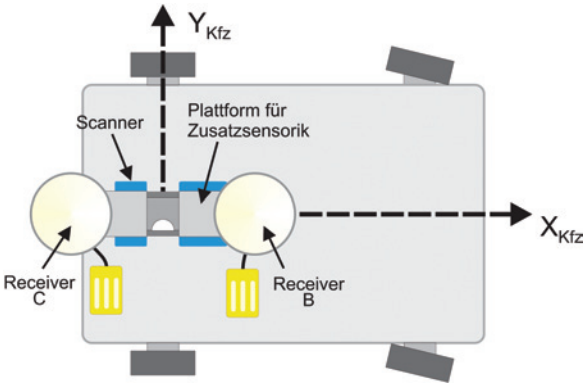


Abbildung 6.5: Konfiguration mit zwei Empfängern

Bei Verwendung eines GPS-Empfängers (Abbildung 6.4) kann die Trajektorienberechnung für die Hinterachse und somit für den Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems nach dem in Kapitel 3.2.4 diskutierten Verfahren erfolgen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass sich der Nullpunkt der GPS-Antenne über dem Drehpunkt der vorderen Fahrzeugachse befindet.

Abbildung 6.6: Trimble 5700
(Trimble GmbH, 2007)

Abbildung 6.7: Trimble R8
(Trimble GmbH, 2007)

Bei der alternativen Variante mit zwei symmetrisch vor und hinter der Stehachse des Scanners angeordneten GPS-Antennen (Abbildung 6.5) wird die horizontale Position des Fahrzeugnullpunktes hingegen direkt als Mittel zwischen beiden Antennen bestimmt. Zwar werden für diese Konfiguration zwei GPS-Empfänger mit vergleichbaren Leistungsdaten benötigt, jedoch besteht hierbei die zusätzliche Möglichkeit einer direkten Azimutbestimmung aus den gemessenen Koordinatendifferenzen über die in Kapitel 3.7.4 vorgestellte relative DGPS-Positionierung.

Daten/Signale	**Trimble 5700**	**Trimble R8**	**Leica GPS1200**
Positionen	• (10 Hz)	• (10 Hz)	• (20 Hz)
PPS Signal	• (1 Hz)	-	• (1 Hz)
ASCII Timetag	• (1 Hz)	-	• (1 Hz)
Antenne	Zephyr (extern)	Integriert	Standard (extern)

Tabelle 6.5: Datenraten der GPS-Empfänger

Bei der Auswahl möglicher GPS-Empfänger zur Umsetzung der genannten Konfigurationen wurden die Modelle Trimble 5700 (Abbildung 6.6) und Trimble R8 (Abbildung 6.7) in Betracht gezogen, da

sie am Geodätischen Institut verfügbar waren. Alternativ können auch Empfänger von Herstellern wie Leica verwendet werden. Beide Modelle sind geodätische L1/L2-Empfänger und unterscheiden sich wesentlich durch die Möglichkeit zur Ausgabe eines PPS-Pulses (Tabelle 6.5) sowie durch den verwendeten Antennentyp.

Da die Erfassung des PPS-Pulses als entscheidende Voraussetzung zur Synchronisierung von Scandaten und Raumposition benötigt wird, ist die Verwendung von mindestens einem Trimble 5700 Empfänger zwingend notwendig. Hinsichtlich der Datenrate wurde bei beiden Empfängern die maximal mögliche Positionierungsrate von 10 Hz verwendet, um eine möglichst große Anzahl unabhängiger Einzelpositionen für die Trajektorienbestimmung zu erhalten. Tabelle 6.6 zeigt die bei Messraten von 1 Hz und 10 Hz erzielbaren horizontalen Punktabstände bei Geradeausfahrt.

Geschwindigkeit	**1 Hz**	**10 Hz**
5 km/h	1.39 m	0.14 m
10 km/h	2.78 m	0.28 m
15 km/h	4.17 m	0.42 m
25 km/h	6.94 m	0.69 m

Tabelle 6.6: Punktabstände der GPS-Positionen

In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass eine Interpolation der mit 1 Hz verfügbaren Daten der virtuellen Referenzstation (VRS) des SAPOS-Netzes auf eine Frequenz von 10 Hz insbesondere bei höheren Bewegungsgeschwindigkeiten erforderlich ist (Kapitel 3.6.4). So liegen die Abstände der mit 1 Hz bestimmten GPS-Positionen insbesondere bei hohen Fahrtgeschwindigkeiten in einer Größenordnung, bei der eine vollständige Erfassung der befahrenen Trajektorie nicht in jedem Fall möglich ist.

Es ist jedoch einschränkend zu bemerken, dass eine Erhöhung der Abtastraten durch Verwendung höherfrequent messender GPS-Empfänger nicht in jedem Fall sinnvoll ist. Bedingt durch den geringen zeitlichen Abstand der Messwerte können Autokorrelationen entstehen, die signifikanten Einfluss auf das aufgezeichnete Signal haben. Zur Auswertung derartig beeinflusster Messungen sind sogenannte Formfilter-Ansätze zu verwenden, deren stochastisches Modell in der Lage ist, zeitliche Korrelationen zwischen den Messwerten zu berücksichtigen (Kuhlmann, 2003; Ramm, 2006).

Der Trimble 5700 besitzt drei 7-polige Schnittstellen, von denen eine zur Ausgabe des PPS-Pulses sowie des dazugehörigen Zeitstempels im ASCII-Format genutzt werden kann. Aus Abbildung 6.8 geht hervor, dass Zeitstempel und PPS-Signal mit einem Versatz von 500 ms zueinander ausgegeben werden. Aus diesem Grund sollte die serielle Schnittstelle zur Erfassung der Zeitstempel mit einer Frequenz von mindestens 1 Hz abgefragt werden, um den PPS-Pulsen P(0) und P(1) die entsprechenden Zeitstempel Z(0) und Z(1) zuzuordnen.

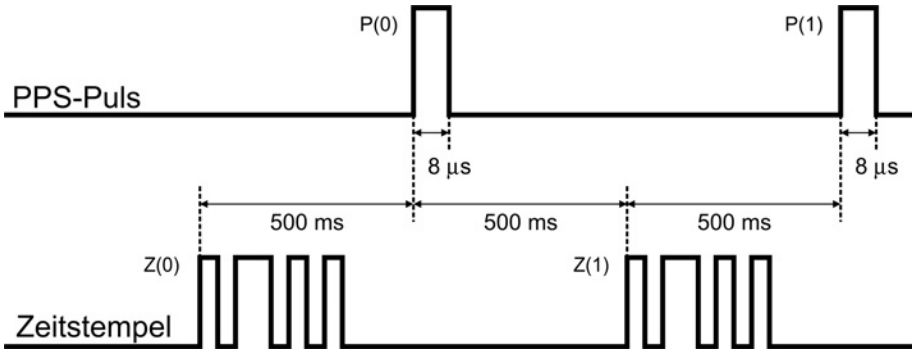


Abbildung 6.8: Versatz zwischen Zeitstempel und PPS-Puls

Die Breite des PPS-Pulses beträgt 8 μs mit einer Genauigkeit von annähernd 1 μs. Diese ergibt sich aus den Faktoren Ansteigzeit, Abfallzeit und Auflösung der Flanken. Hinzu kommt eine durch die varianzbehaftete Position des Empfängers bedingte Ungenauigkeit des Zeitsignals von wenigen Nanosekunden.

Die zu den PPS-Signalen korrespondierenden Zeitstempel werden vom Empfänger über RS-232-codierte serielle Leitungen der Empfängerschnittstelle mit einer Geschwindigkeit von 19200 Baud ausgegeben und können somit durch jedes RS-232 fähige Schnittstellenmodul erfasst werden. Neben dem in der UTC-Skala

angegebenen Zeitstempel werden vom Empfänger weitere Systeminformationen zur Verfügung gestellt, aus denen sich die Art der Positionsbestimmung (engl: „Type of Position-Fix“) sowie die Anzahl der für die Positionsbestimmung genutzten Satellitensignale ergibt. Aufgrund dieser Information kann festgestellt werden, ob Code- oder Phasenmessungen zur Positionsbestimmung verwendet wurden beziehungsweise ob eine gültige Positionsinformation vorliegt. Eine detaillierte Übersicht über die Arten des Position-Fix kann Trimble GmbH (2005) entnommen werden.

```
UTC JJ.MM.TT hh:mm:ss XY                Abkürzungen:
UTC 05.12.23 07:26:21 59                JJ:    Jahr      MM: Monat      TT: Tag
UTC 05.12.23 07:26:22 59                hh:    Stunde    mm: Minute    ss: Sekunde
UTC 05.12.23 07:26:23 59                X:     Art der Positionsbestimmung
UTC 05.12.23 07:26:24 58                Y:     Anzahl der verfügbaren Satelliten
UTC 05.12.23 07:26:25 ??                XY=??: Keine Positionsbestimmung möglich
```

Abbildung 6.9: Inhalt des Zeitstempels eines Trimble 5700

Ein Zeitstempel, der am 23. Dezember 2005 über einen Zeitraum von 5 Sekunden aufgezeichnet wurde, ist in Abbildung 6.9 zu sehen. Zusätzlich zur UTC-Zeit ist zu erkennen, dass sich die Anzahl der genutzten Satellitensignale um 07:26:24 von 9 auf 8 Satelliten ändert. In der darauffolgenden Sekunde wurde die Kabelverbindung zum Empfänger unterbrochen, so dass keine Satellitensignale mehr zur Verfügung standen und somit auch keine Positionsbestimmung durchgeführt werden konnte.

Diese Zusatzinformationen können zur dynamischen Steuerung des Erfassungsvorgangs genutzt werden. So kann die Datenerfassung durch den Laserscanner nach einer vordefinierten Ausfallzeit der GPS-Signale unterbrochen werden, um eine Speicherung der großvolumigen Scandaten zu vermeiden. Eine solche automatisierte Steuerung ist als unterstützende Maßnahme für den Benutzer zu betrachten, da die Bestimmung von Scanpunkten bei Überschreiten der geforderten Positionsgenauigkeit nicht mehr sinnvoll ist.

Die Speicherung der Positionsdaten erfolgt beim Trimble 5700 auf einer Speicherkarte vom Typ „CompactFlash“, beim Trimble R8 im internen Speicher des Empfängers. Eine Datenspeicherung auf externen Rechnern oder Speichermedien ist zwar grundsätzlich möglich, im Rahmen der verwendeten Datenraten von 10 Hz jedoch nur bei sehr langen Beobachtungszeiten notwendig.

6.2.2 Inklinometer

Sensoren, die dazu geeignet sind, Neigungen oder Neigungsänderungen im Bezug zur Lotrichtung zu erfassen, werden allgemein als Neigungsmesser oder auch Inklinometer bezeichnet. Zur Neigungsmessung existiert eine große Zahl unterschiedlicher Verfahren, die sich im Wesentlichen durch ihren Messbereich, ihre Eigenfrequenz, ihre Robustheit gegenüber Erschütterungen und Störbeschleunigungen sowie ihren Preis unterscheiden.

Wie aus Abbildung 6.10 ersichtlich ist, kann eine Klassifizierung von Inklinometern sowohl anhand der Methode zur Realisierung der Neigungsinformation als auch durch die Art der physikalischen Messwerterfassung vorgenommen werden. Die beiden genannten Methoden zur Realisierung der Neigungsinformation und zur Messwerterfassung sind jedoch nicht in jedem Fall streng aneinander gekoppelt, sondern werden in verschiedenen Kombinationen angeboten. So sind Inklinometer mit kapazitivem Messprinzip sowohl als flüssigkeitsbasierte Neigungsmesser (Abbildung 6.11) als auch in Form von Pendelneigungsmessern (Ingensand, 1985) realisiert.

Die in einem Sensor verwendete Methode zur Realisierung von Neigungsinformationen ist im wesentlichen vom Einsatzzweck und den Anforderungen an Robustheit, Auflösung und Messfrequenz abhängig. So besitzen Pendelneigungsmesser mit Ausnahme der servobasierten Varianten in der Regel kleinere Messbereiche, innerhalb derer die Neigungen jedoch mit vergleichsweise hoher bis sehr hoher Genauigkeit erfasst werden können. Demgegenüber können flüssigkeitsbasierte Sensoren günstiger produziert werden, sind robuster und in der Regel auf große Messbereiche mit geringeren Genauigkeitsanforderungen ausgerichtet. Für Anwendungen, bei denen große Neigungsunterschiede auftreten und gleichzeitig eine hohe Linearität gefordert wird, kommen vor allem Neigungsmesser zum Einsatz, die nach dem servomotori-

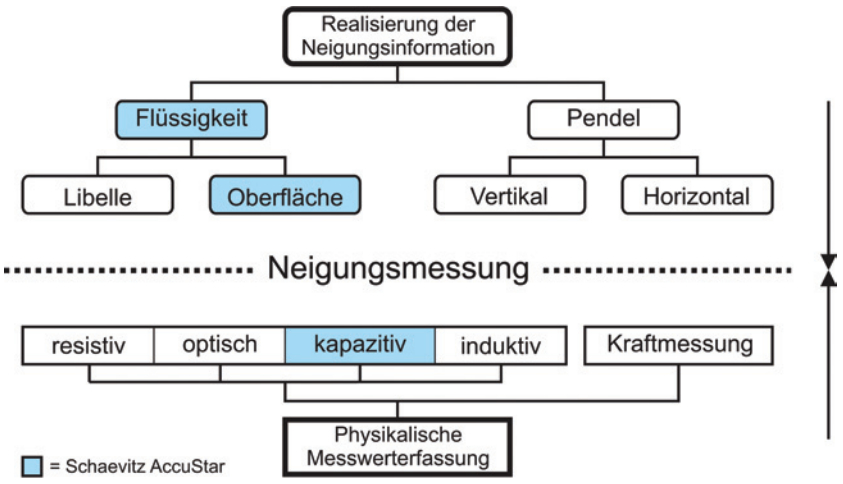


Abbildung 6.10: Klassifizierung verschiedener Inklinometer-Bauformen (Schlemmer, 1996)

Abbildung 6.11: AccuStar Inklinometer von Schaevitz

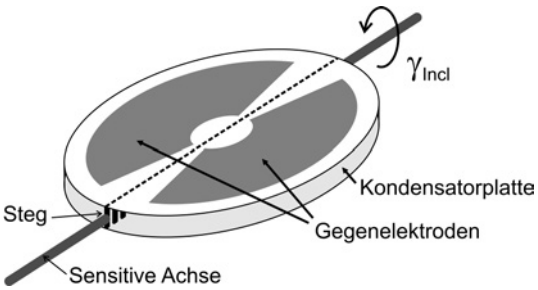


Abbildung 6.12: Funktionsprinzip eines Differentialkondensators

schen Prinzip (Pendel) arbeiten. Hierzu zählen die LSO-Serie von Schaevitz oder die DMT-Rotlevel mit Q-Flex-Beschleunigungsmesser (Pfläging, 1988).

Für das vorliegende System wurde das AccuStar-Inklinometer (Abbildung 6.11), ein kapazitiver Neigungsmesser mit Flüssigkeitshorizont, der Firma Sherborne Schaevitz ausgewählt. Das flüssigkeitsbasierte Messprinzip dieses Inklinometers wirkt sich insoweit vorteilhaft aus, als keinerlei bewegliche Teile für die Neigungsmessung benötigt werden. Dies ist insbesondere beim Einsatz auf mobilen Plattformen von Vorteil, bei dem häufige Erschütterungen während der Messung zu erwarten sind und somit erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Robustheit gestellt werden. Der Sensor bietet darüber hinaus einen - verglichen mit Pendelneigungsmessern - vergrößerten Messbereich und ist deutlich preisgünstiger als ein Servoneigungsmesser. Zudem kann dieser Sensor aufgrund seines Signalausgangs problemlos an A/D-Wandlungsmodulen betrieben werden.

Der Sensor besteht aus einem flachen Differentialkondensator, der durch eine kreisförmige Metallwanne und zwei darüber befindlichen Gegenelektroden aus Kupfer gebildet wird. Die Metallwanne ist in der Mitte durch einen dünnen Steg in zwei Kammern unterteilt, zwischen denen die jeweiligen Kapazitätsdifferenzen bestimmt werden (Abbildung 6.12).

In beiden Messkammern befindet sich eine Flüssigkeit mit hoher Dielektrizität und einem darüberliegenden Gaspolster. Neigt sich der Sensor um seine sensitive Achse, so fließt ein Teil der Flüssigkeit durch feine Schlitze im Steg langsam von einer Kammer in die andere. Je nach Neigung befinden sich unterschiedliche Mengen der Flüssigkeit zwischen den beiden Elektroden und der Kondensatorplatte. Die resultierenden Kapazitätsunterschiede können über einen Schwingkreis mit Zählmodul erfasst und in Neigungswerte umgerechnet werden. Der maximale Frequenzgang und die Dämpfung des Sensors hängen somit von der Fließgeschwindigkeit zwischen beiden Kammern ab.

Die Geometrie der symmetrischen Gegenelektroden bestimmt hierbei die Kurvenform des Ausgangssignals (Althen, 2006). Die in Abbildung 6.12 dargestellte Kondensatorform erzeugt einen proportionalen Zusammenhang zwischen Neigungswinkel und Ausgangssignal und somit einen linearen Signalverlauf, der jedoch nur für Messwerte zwischen $-45° < \gamma_{Incl} \leq +45°$ Gültigkeit besitzt. Bei Neigungen von mehr

Parameter	Wert	Anmerkung
Gesamter Messbereich	$\pm 60°$	
Linearer Messbereich	$\pm 45°$	
Auflösung	$0.001°$	Neigungsänderung, ab der die Änderung des Ausgangssignals größer als das Rauschen ist
Skalierungsfaktor	60 mV/°	Physikalische Auflösung über den gesamten Neigungsbereich
Querneigungsfehler	$< 1\%$ $(0 - 45°)$	Auswirkung, die eine Neigung des Sensors quer zur sensitiven Achse verursacht (engl.: cross-axis-error)
Linearitätsfehler		
$0 - 10°$	$\pm 0.1°$	Abweichung von linearem Zusammen-
$10 - 45°$	$\pm 0.6°$	hang zwischen Neigung und Aus-
$45 - 60°$	monoton	gangssignal
Nullpunktreproduzierbarkeit	$0.05°$	Abweichung bei Wiederherstellung der Nulllage
Temperaturkoeffizient		
$TK_{Nullpunkt}$ [V/K]	$0.29 \cdot 10^{-3}$	Änderung des Nullpunktes durch Temperatureinfluss
$TK_{Maßstab}$ [V/°K]	$60 \cdot 10^{-6}$	Änderung des Maßstabes durch Temperatureinfluss
Reaktionszeit	0.3 s	Zeitverzögerung der Reaktion auf Neigungsänderung
Frequenzgang	0.5 Hz	Maximal mögliche Frequenz einer sinusförmigen Neiungsänderung

Tabelle 6.7: Technische Daten AccuStar

als 45° führen selbst größere Neigungsänderungen nur zu einer geringen Variation der von der Flüssigkeit bedeckten Kondensatorfläche. Im Hinblick auf Fertigungstoleranzen kann aus diesem Grund kein linearer Zusammenhang mehr für die inverse Berechnung der Neigungswerte aus Kapazitätsdifferenzen unterstellt werden. Die technischen Daten des verwendeten AccuStar Neigungsmessers können Tabelle 6.7 entnommen werden.

Schaevitz bietet das AccuStar Inklinometer mit den folgenden vier Schnittstellentypen an, die jeweils für horizontale und vertikale Montagerichtung erhältlich sind:

- Ratiometrische Ausführung
- Analoge Ausführung
- Serielle Ausführung
- Digitale Pulsbreiten Ausführung

Für das vorliegende Messsystem wurde die analoge Ausführung des AccuStar Inklinometers verwendet, die mit einer bidirektionalen Eingangsspannung im Bereich zwischen ±8 V und ±15 V Gleichspannung arbeitet, da diese vergleichsweise einfach über einen A/D-Wandler in ein Messsystem zu integrieren ist. Abbildung 6.13 zeigt den Signalausgang über den gesamten Messbereich.

Der zur Umrechnung des Ausgangssignals in Neigungswerte benötigte Skalierungsfaktor $\tau_{AccuStar}$ besitzt einen konstanten Wert von

$$\tau_{AccuStar} = 60 \text{ mV}/° \tag{6.3}$$

bei einer Toleranz des Ausgangssignals von ±10% (Althen, 2006). Die Auflösung der Libelle als Maß für die kleinstmögliche Neigungsänderung, die zu einer Signaländerung führt, wird vom Hersteller mit einem Wert von 0.001° angegeben (Tabelle 6.7).

Da der Sensor einen analogen Signalausgang besitzt, ist dieser Wert nicht als kleinstmöglicher Signalschritt zu verstehen, sondern beschreibt vielmehr das Verhältnis zwischen einem Messsignal und dem Grundrauschen, welches ab einer Neigungsänderung von $\Delta_\gamma > 0.001°$ trennbar ist. Mit Hilfe von Formel (6.3) ergibt sich folgende kleinstmögliche Spannungsänderung ΔV_{min}, die im Grenzbereich der Auflösung zu erwarten ist:

$$\Delta V_{min} = 60\ \mu V. \tag{6.4}$$

Dieser Wert ist bei der Auswahl eines entsprechenden A/D-Moduls zu berücksichtigen, welches die Erfassung der Spannungswerte im Echtzeitrechner durchführen soll.

Zur Korrektion systematischer Messabweichungen ist bei der Verwendung flüssigkeitsbasierter Inklinometer die Erfassung der Sensortemperatur zu berücksichtigen. Wie aus Tabelle 6.7 hervorgeht, verursacht ein Temperaturunterschied von 5 K bei einer Neigung der Libelle von $\gamma_{Incl} = 20°$ eine Unsicherheit der Neigungsbestimmung in einer Größenordnung von $\sigma_\gamma = 0.006°$. Zur Kalibrierung des Temperatureinflusses auf die Neigungsmessung siehe auch Kapitel 7.4.

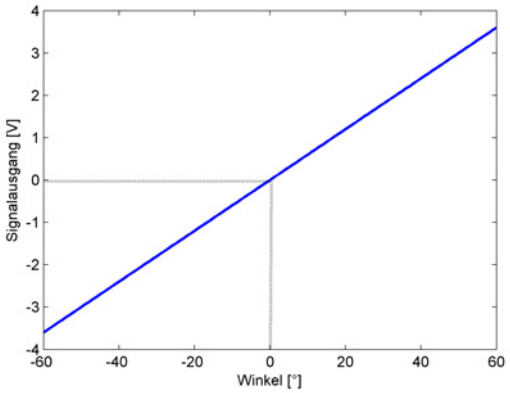


Abbildung 6.13: Analoger Signalausgang AccuStar

Die generelle Empfindlichkeit von Inklinometern gegenüber Störbeschleunigungen erweist sich bei der Verwendung in mobilen Messsystemen als Nachteil. So ist eine gemessene Neigung nicht allein auf den Vektor der Erdbeschleunigung g bezogen, sondern kann auch durch beliebige Beschleunigungen a_Y und a_Z gestört werden, die in einer senkrecht zur Neigungsachse aufgespannten Ebene auftreten. Parallel dazu auftretende Beschleunigungen a_X sind innerhalb gewisser Grenzen unschädlich (Abbildung 6.14).

Durch diesen Effekt sind die während einer beschleunigten Bewegung (zum Beispiel einer Kurvenfahrt) gemessenen Neigungen um Störbeschleunigungen verfälscht, die nicht vom deterministischen Signal getrennt werden können. Aus diesem Grund wird in Mobile-Mapping-Systemen häufig auf die Verwendung von Inklinometern zur Bestimmung der Raumwinkel verzichtet und auf inertiale Systeme zurückgegriffen.

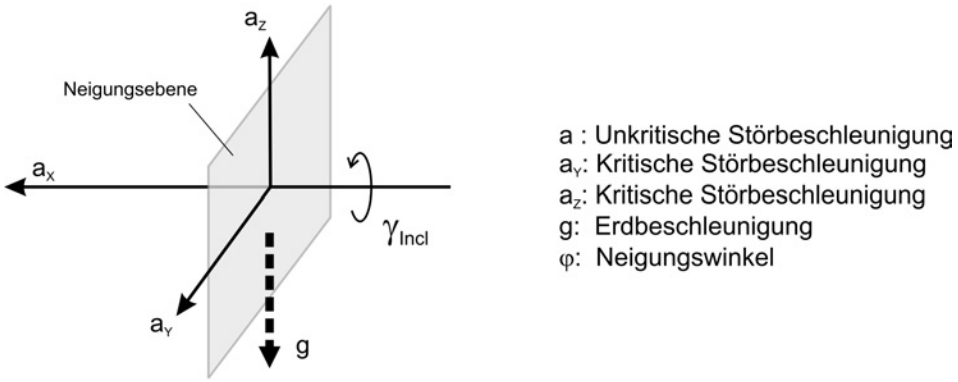


Abbildung 6.14: Einfluss von Störbeschleunigungen

Zur Korrektion systematischer Effekte, die durch Störbeschleunigungen hervorgerufen werden, können prinzipiell die durch eine Kalman-Filterung ermittelten Beschleunigungsvektoren des Fahrzeuges genutzt werden (Kapitel 3.4.1). Über eine zu bestimmende Korrekturfunktion in Abhängigkeit der Vertikal- (a_Z) und Lateralbeschleunigung (a_Y) entlang der Trajektorie

$$k_{Incl} = \boldsymbol{f}(a_y; a_z; \gamma_{Incl}) \tag{6.5}$$

könnten die in den Neigungswerten enthaltenen fahrdynamisch bedingten Störbeschleunigungen berücksichtigt werden, die von der Kurvengeschwindigkeit und dem Radius abhängen.

6.2.3 Thermometer

Die Temperaturabhängigkeit von Sensoren, wie zum Beispiel von Inklinometern, ist insbesondere bei kinematischen Anwendungen unter wechselnden Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Zur Vermeidung systematischer Effekte, die durch unberücksichtigte Temperaturänderungen entstehen, sind allgemein zwei Ansätze möglich.

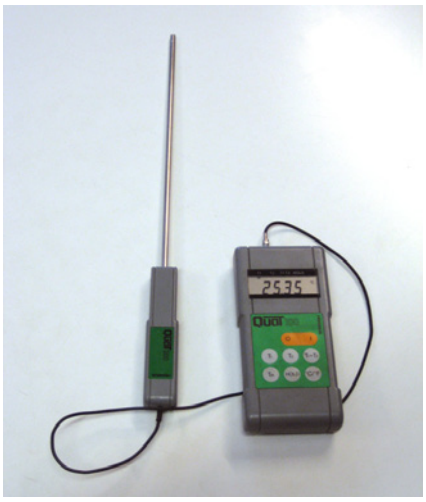


Abbildung 6.15: QuaT Sensor

Zum einen können die Sensoren eines Systems in klimatisierten Behältnissen untergebracht werden, die für gleichbleibende Umgebungsbedingungen während der Messung sorgen. Idealerweise lassen sich hierdurch Umgebungsbedingungen schaffen, die auch bei der Kalibrierung aller Sensoren im Labor vorherrschten, so dass temperaturbedingte Messabweichungen ausgeschlossen werden können.

Ein solches Vorgehen wird im Fall des GeoVAN-Systems verfolgt, bei dem die Mehrzahl der Sensoren innerhalb einer klimatisierten Sensorkammer untergebracht sind (Talaya u. a., 2004b). Neben dem hohen technischen und finanziellen Aufwand wirkt sich bei dieser Lösung vor allem der deutlich erhöhte Stromverbrauch des Gesamtsystems negativ aus.

Zum anderen können externe Temperatursensoren zur Erfassung der aktuellen Umgebungs- oder Sensortemperatur verwendet werden, sofern die Einzelsensoren keine internen Temperaturmessungen durchführen können. Diese Alternative ist aus technischer Sicht einfacher zu realisieren, erfordert jedoch einen erhöhten Aufwand bei der Kalibrierung von Sensoren und der Anbringung von Korrekturwerten. Da eine Ermittlung von Temperaturkorrektionen im Rahmen der durchzuführenden Kalibrierarbeiten grundsätzlich möglich ist, wird für das vorliegende System der Ansatz einer expliziten Messung der Umgebungstemperatur in Sensornähe präferiert.

Als Temperatursensor kommt in diesem System ein QuaT 200-Sensor der Firma W. C. Heraeus (Abbildung 6.15) zum Einsatz. Der Messwertaufnehmer des QuaT verwendet einen temperaturempfindlichen Schwingquarz, der neben einer hohen Drift- und Alterungsstabilität (Schaudel, 1989) eine fünffach höhere Messgenauigkeit im Vergleich zu den verbreiteten PT100 Sensoren bietet (Gertig, 1988). Die Ausgabe der Messwerte erfolgt nach Messstellen getrennt über eine serielle RS-232-Schnittstelle mit einer Frequenz von 1 Hz, wobei der gleichzeitige Betrieb von bis zu 16 Einzelsensoren möglich ist.

Die technischen Daten des QuaT-Sensors sind zur Übersicht in Tabelle 6.8 aufgelistet. Die Systemgenauigkeit, bestehend aus Sensorgenauigkeit, Signalübertragung und Fehler der Linearisierung wird von Brendecke (1987) mit maximal 0.1 K im Bereich von -20° C bis +130° C angegeben.

Parameter	**Wert**
Messbereich	
minimum	$-40°\ C$
maximum	$+300°\ C$
Auflösung	$0.01\ K$
Linearitätsfehler	
$-20°C$ bis $+130°C$	$0.1\ K$
übriger Bereich	1% des Messwertes

Tabelle 6.8: Technische Daten QuaT

Für eine weitergehende Betrachtung des Messprinzips sei an dieser Stelle auf Bechmann u. a. (1962) und Brendecke (1987) verwiesen. Ein Vergleich der Linearitäten verschiedener Schwingquarzsensoren wird von Priess (1982) vorgenommen.

6.2.4 Laserscanner

Wie bereits in Kapitel 1 diskutiert, stellt die Umgebungserfassung mit einem präzise synchronisierten terrestrischen Laserscanner eine der wesentlichen Neuerungen des vorliegenden Systems dar. Neben der Fähigkeit, Messungen im Profilmodus quer zur Fahrtrichtung durchzuführen, soll die durch das System erstellte Punktwolke möglichst hochaufgelöst sein. Die Forderung nach hoher Auflösung kann nicht allein durch eine kleine Schrittweite der Strahlablenkung erfüllt werden, da sich diese ausschließlich in der Ebene des Scanprofils auswirkt. In Fahrtrichtung hängt die realisierbare Punktdichte neben der Fahrtgeschwindigkeit vor allem von der Profilfrequenz des Scanners ab, die aus diesem Grund ein hohes Gewicht bei der Wahl des passenden Laserscanners besitzt.

Für den Einsatz im vorliegenden System wurde der Imager 5003 von Zoller+Fröhlich (auch Leica HDS 4500) ausgewählt. Wie bereits in Kapitel 4.5.6 diskutiert, besitzt dieser Scanner ein vergleichsweise großes Gesichtsfeld von 320° und erfüllt zudem die an das System gestellten Anforderungen vollständig. Eine ausführliche Übersicht über die Leistungsdaten des Imager 5003 kann Anhang A entnommen werden.

Der Imager ermöglicht in der Standardausführung Profilfrequenzen zwischen 12.5 Hz und 33 Hz, die nach Angaben des Herstellers auf bis zu 50 Hz erhöht werden kann. Die räumliche Auflösung in Profilrichtung ist, wie bereits in Kapitel 4.5.2 diskutiert, abhängig von der gewählten Profilfrequenz (Tabelle 4.3). Das Nachfolgemodell Imager 5006, das zum Zeitpunkt der Systementwicklung noch nicht verfügbar war, ermöglicht darüber hinaus Profilmessungen mit einer Frequenz von bis zu 100 Hz.

Profilfrequenz	**Querauflösung**	**Längsauflösung**			
	(20 m Entfernung)	**5 km/h**	**10 km/h**	**15 km/h**	**25 km/h**
12.5 Hz	0.6 cm	11.1 cm	22.2 cm	33.3 cm	55.5 cm
18.4 Hz	1.2 cm	7.5 cm	15.1 cm	22.6 cm	37.7 cm
25.0 Hz	1.2 cm	5.5 cm	11.1 cm	16.6 cm	27.8 cm
33.0 Hz	2.5 cm	4.2 cm	8.4 cm	12.6 cm	21.0 cm
50.0 Hz[1]	2.5 cm	2.7 cm	5.5 cm	8.3 cm	13.9 cm

[1]Erweiterung der Hardware notwendig

Tabelle 6.9: Vergleich der Auflösungen in Längs- und Querrichtung

Bei der Wahl der Profilfrequenz ist zu beachten, dass die erfasste Punktwolke in allen Richtungen eine vergleichbare Auflösung besitzen sollte. Die durch die Kombination von Profilfrequenz und Fahrtgeschwindigkeit realisierbaren Punktabstände in Längsrichtung (Längsauflösung) sowie die entsprechenden Auflösungen innerhalb der Profilebene (Querauflösung) sind in Tabelle 6.9 für verschiedene Fahrtgeschwindigkeiten dargestellt.

Aus dieser Übersicht wird klar, dass die Längsauflösung der Punktwolke selbst bei einer Profilfrequenz von 33 Hz und einer vergleichsweise geringen Geschwindigkeit von 5 km/h um 1.7 cm höher als die Querauflösung ist. Aus diesem Grund sollte der Scanner nach Möglichkeit mit hohen Profilfrequenzen betrieben werden, um eine gleichmäßig aufgelöste Objekterfassung zu gewährleisten.

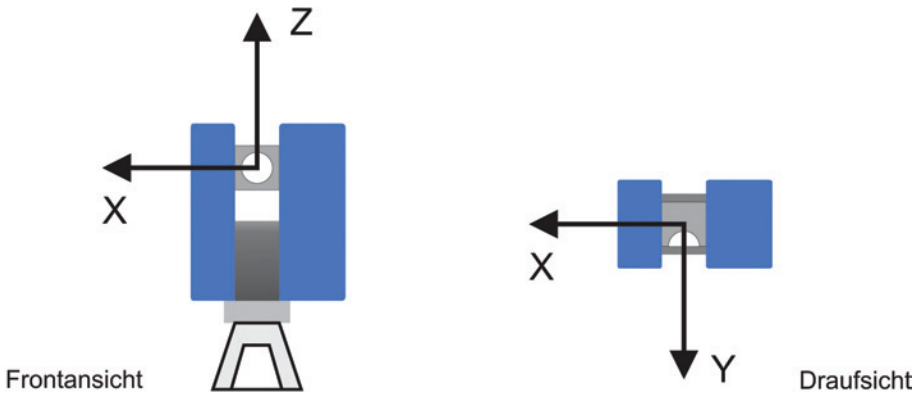


Abbildung 6.16: Rechtshändiges Koordinatensystem des Imager 5003

Die erfassten Objektpunkte werden für 1D-, 2D- und 3D-Messungen vom Scanner als kartesische Koordinaten in einem rechtshändigen System ausgegeben (Abbildung 6.16), wodurch eine Transformation der

erfassten Objektpunkte in das Fahrzeugkoordinatensystem ohne weitere Umformungen möglich ist. Jeder Einzelpunkt wird hierbei durch seine X-,Y- und Z-Koordinaten sowie den Remissionswert des zurückgestreuten Lasersignals repräsentiert. Der Remissionswert besitzt eine Auflösung von 15 Bit und kann wahlweise als Integer in den Grenzen von 0..32768 oder normiert auf die Bereiche 0..1 oder 0..255 ausgegeben werden. Die vier Parameter sind in einem Zeilenvektor nach folgendem Schema zusammengefasst:

$$\begin{bmatrix} n \cdot 10^{-2} \\ X \\ Y \\ R \end{bmatrix}^T \text{, mit} \quad \begin{array}{ll} n & \text{: Profilnummer} \\ X & \text{: Y-Koordinate [m]} \\ Y & \text{: Z-Koordinate [m]} \\ R & \text{: Remissionswert (15 Bit)} \end{array} \tag{6.6}$$

Die Ausgabe von Daten erfolgt beim Imager 5003 auf zwei verschiedenen Schnittstellen. Die Steuerung des Scanners von einem PC oder Notebook aus wird ebenso wie die Übertragung der Daten in entgegengesetzter Richtung über eine FireWire-Schnittstelle durchgeführt. Die Rohdaten eines Scans werden in einem proprietären Binärformat, dessen Struktur durch den Hersteller nicht veröffentlicht ist, auf dem angeschlossenen Steuerrechner gespeichert. Die Speicherung der Rohdaten erfolgt auf der lokalen Festplatte des angeschlossenen Notebooks. Im Anschluss an eine Messung können die binären Rohdaten wahlweise über die Steuersoftware des Scanners oder mit Hilfe von Bibliotheksfunktionen zur Weiterverarbeitung durch externe Software ins ASCII-Format umgewandelt werden.

```
  X     Y      Z   Intensität
0.030 1.109 -1.248 760
0.030 1.116 -1.243 755
0.030 1.127 -1.243 675
0.030 1.126 -1.230 783
0.030 1.160 -1.254 622
0.030 1.152 -1.233 544
0.030 1.176 -1.245 611
0.030 1.203 -1.262 609
```

Abbildung 6.17: ASCII-codierter Datensatz einer Profilmessung

Bei der Umwandlung vom herstellerspezifischen Binär- in das in Abbildung 6.17 dargestellte ASCII-Format ist zu beachten, dass sich das Datenvolumen einer Punktwolke deutlich vergrößert. Für die nachfolgende Auswertung bedeutet dies, dass der Zugriff auf Punktinformationen nach Möglichkeit über die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Bibliotheksfunktionen stattfinden sollte, da mit Hilfe dieser Funktionen Daten direkt aus der Binärdatei gelesen werden können.

Die Kommunikation zwischen externem Notebook und dem Scanner erfolgt, wie bereits in Kapitel 4.5.2 erläutert, auf Basis des TCP/IP-Protokolls (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) nach dem Client-Server-Prinzip. Während des Scanvorganges ist es dadurch möglich, die vom Scanner gelieferten Statusinformationen periodisch abzurufen und für eine spätere Auswertung zu nutzen.

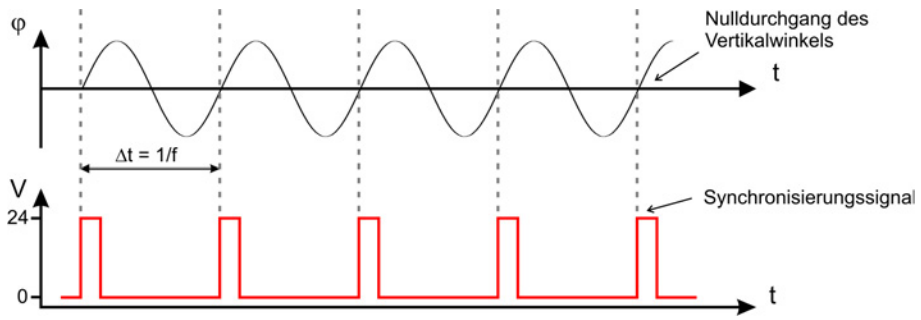


Abbildung 6.18: Synchronisierung des Imager im Profilmodus

Zur Synchronisierung der Scandaten mit externen Sensoren können beim Imager 5003 prinzipiell die beiden in Abbildung 6.1 beschriebenen Optionen „A“ und „B“ genutzt werden. Aus den bereits dargelegten Gründen soll im vorliegenden Prototypen die Synchronisierung mit Hilfe eines durch den Scanner

erzeugten Rechtecksignals und eines echtzeitfähigen Messrechners umgesetzt werden. Zur Ausgabe eines Synchronisierungspulses kann eine weitere Datenschnittstelle des Scanners genutzt werden, über die ein 24 V-Rechtecksignal bei jedem Nulldurchgang des Vertikalencoders ausgegeben wird (Abbildung 6.18).

6.3 Das Echtzeitmesssystem

6.3.1 Sensorkonfiguration und Datenformate

Für die Integration der in den Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.4 vorgestellten Sensoren in ein echtzeitfähiges Messsystem sind heterogene Datenformate und Signaltypen mit unterschiedlichen Datenraten zu erfassen. Die Tabelle 6.10 gibt einen Überblick über die Charakteristika der Daten sowie die Prioritäten und Echtzeitanforderungen, mit denen diese zu erfassen sind.

Datenquelle	Priorität	max. Latenzzeit	Datenrate	Echtzeitforderung
GPS				
PPS-Puls	1	360 μs	1 Hz	hart
Daten		-	1 Hz	-
Laserscanner				
Sync-Puls	2	360 μs	f_P^{-1}	fest
Daten		-	$<$ 45 GByte/h	-
Inklinometer	3	Periodendauer	10 Hz	fest
Temperatursensor	4	Periodendauer	0.05 Hz	weich

f_P: Profilfrequenz

Tabelle 6.10: Latenzzeiten und Echtzeitforderungen an die Datenquellen

In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die Erfassung des PPS-Pulses mit harten Echtzeitanforderungen verknüpft ist, da die Qualität der gesamten Messergebnisse von der korrekten Referenzierung aller Daten abhängt. Demgegenüber werden an die Erfassung des Synchronisierungssignals des Laserscanners sowie an die Neigungsmessung des Inklinometers lediglich feste Echtzeitanforderungen gestellt, da diese Daten auch aus benachbarten Messwerten abgeleitet oder interpoliert werden können. Die Erfassung der Umgebungstemperatur dient lediglich zur Korrektion temperaturbedingter Messabweichungen und ist aus diesem Grund mit weichen Echtzeitanforderungen umzusetzen.

Ausgehend von diesen Sensoren sind die folgenden Schnittstellen vom Echtzeitmesssystem für die Datenerfassung bereitzustellen:

- Digitale I/O-Schnittstelle
- Serielle Schnittstelle
- Analoge Spannungsschnittstelle

Die digitalen I/O Schnittstellen dienen zur Erfassung von GPS- und Scannersignal und müssen zwingend interruptfähig sein, um einen ereignisgesteuerten Messablauf zu ermöglichen. Die technischen Anforderungen an die seriellen Schnittstellen beschränken sich auf die zu gewährleistende Geschwindigkeit von 19200 Baud zur Aufzeichnung des PPS-Zeitstempels. Die Erfassung der Inklinometermesswerte ist über eine analoge Schnittstelle durchzuführen, die in der Lage sein muss, bipolare Spannungspegel im Bereich von $\pm$3.6 V mit einer Abtastrate von besser als 10 Hz zu erfassen.

Zur Übertragung der notwendigen Erfassungsprogramme auf den Echtzeitrechner, zum Auslesen der erfassten Synchronisierungsdaten und zur Steuerung des Messablaufes wird das zur Speicherung der Scandaten vorhandene Notebook über eine Ethernet-LAN (Local-Area-Network) Verbindung mit dem Echtzeitrechner verbunden. Zu den verschiedenen Möglichkeiten sowie zu Vor- und Nachteilen der Ankopplung des Echtzeitrechners siehe auch Kapitel 6.3.2.

Die Datenspeicherung aller Synchronisierungssignale muss zwangsläufig auf dem Echtzeitrechner erfolgen, um alle Erfassungszeitpunkte auf einer einheitlichen Zeitskala zu registrieren. Die Datenmenge der seriell anfallenden Daten von PPS-Zeitstempel und Temperaturdaten ist aufgrund der geringeren Abtastrate so gering, dass sie ebenfalls durch den Messrechner erfolgen kann.

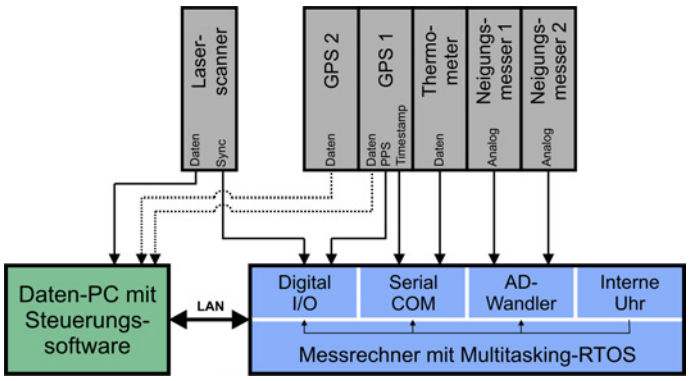


Abbildung 6.19: Realisierte Systemkonfiguration

Hinsichtlich der Rohdaten des Laserscanners ist eine Erfassung durch den Echtzeitrechner weder sinnvoll noch möglich, da hierzu spezielle Gerätetreiber vorausgesetzt werden, die nur für Windows-basierte Betriebssysteme verfügbar sind. Zudem würde die anfallende Datenmenge eine sehr hohe Systemlast erzeugen und hierdurch die präzise Erfassung weiterer Sensorsignale verhindern. Aus diesem Grund wird ein externes Notebook zur Steuerung des Messablaufes und zur Speicherung der Scannerdaten eingesetzt.

Abbildung 6.19 zeigt die in vorliegender Systemkonfiguration realisierte Kopplung von GPS-Empfänger, Laserscanner, Echtzeitmesssystem sowie der benötigten Sensoren.

6.3.2 MAX5dip

Bei der Entscheidung für ein echtzeitfähiges Messsystem fiel die Wahl auf die Hardwareplattform von Sorcus. Als wesentliche Entscheidungsgründe sind die hohe Modularität, die kompakte Bauweise sowie die gute Systemleistung zu nennen. Gegen die Verwendung eines der Systeme von National Instruments sprach das gute Preis-Leistungsverhältnis des Sorcus-Systems sowie die lizenzfreie Verfügbarkeit eines Echtzeitbetriebssystems.

Da für die Realisierung einer Mindestkonfiguration ein CPU-Modul sowie drei Datenerfassungsmodule notwendig sind, fiel die Wahl auf die MAX5dip, deren Basiskonfiguration in Abbildung 6.20 dargestellt ist. Die drei freien Modulsteckplätze sind hinsichtlich der Datenerfassung mit Echtzeitprogrammen gleichwertig, wodurch sich Konfiguration und Bestückungsreihenfolge ausschließlich an der Messaufgabe orientieren.

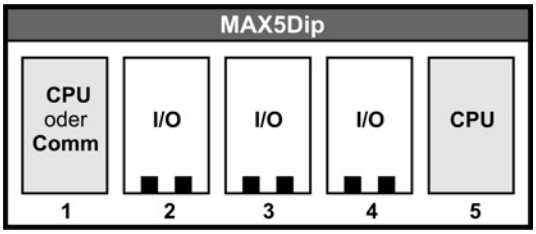


Abbildung 6.20: Steckplatzbelegung auf der MAX5dip

Die mögliche Betriebsspannung der Box liegt zwischen 18.6 V und 36 V bei einer Leistungsaufnahme zwischen 3 W und 26 W, so dass ein Einsatz auf mobilen Plattformen über zwei parallel geschaltete Autobatterien gewährleistet werden kann. Durch die Flexibilität der Stromversorgung wird eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz des Mobile-Mapping Systems auf bewegten Plattformen erfüllt.

Neben einer hohen Flexibilität sind auch Möglichkeiten zur Kommunikation mit potentiellen Anwendern wünschenswert. Zu diesem Zweck besitzt die MAX5dip 16 monochromatische LED, die zwischen den einzelnen Modulsteckplätzen positioniert sind. Neben diesen LED kann auch ein optionales Display oder Touchscreen über Bibliotheksfunktionen angesteuert und zur Signalisierung von Betriebszuständen oder zur Kontrolle von Sensordaten genutzt werden. Zusammen mit der Möglichkeit, Programme direkt aus dem ROM des CPU-Moduls zu installieren, besteht die Möglichkeit, ein vollständig autonomes Echtzeitmesssystem auf Basis der MAX5dip zu betreiben (Abbildung 6.21).

Obwohl die MAX5dip auch ohne eigenes CPU-Modul betrieben werden kann, werden für die Datenerfassung in Echtzeit folgende Komponenten benötigt:

- CPU-Modul (Intel 80486 oder XScale)
- OsX oder Windows CE auf CPU-Modul
- Echtzeitfähige Programme zur Datenerfassung

Die Datenerfassung über die MAX5dip kann hierbei in zwei Betriebsarten durchgeführt werden. Der Einsatz als embedded-System in Verbindung mit einem Host-PC ist insbesondere zur System- und Softwareentwicklung sowie bei zur Erfassung großer Datenmengen von Vorteil. Die Kopplung an den Host-PC ist vor dem Hintergrund des begrenzten Speichers der CPU-Module in den Fällen notwendig, wenn lang andauernde Messaufgaben oder hohe Abtastraten benötigt werden. Im Rahmen der Systementwicklung können die auf dem Host-PC mit speziellen Compilern erstellten Programme direkt vom Host auf dem CPU-Modul installiert und getestet werden.

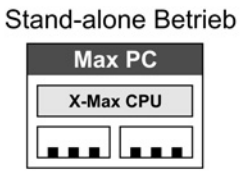


Abbildung 6.21: Autonomer Betrieb der MAX5dip

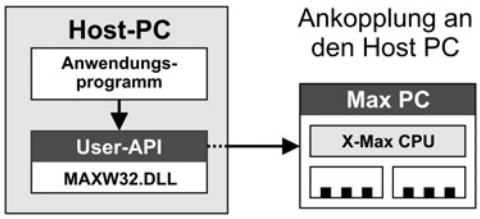


Abbildung 6.22: Betrieb der MAX5dip in Verbindung mit Host-PC

Für den autonomen Betrieb der MAX5dip sind zunächst alle entwickelten Echtzeitprogramme mit Hilfe von Installationsskripten ins ROM der Max-CPU zu übertragen. Hierdurch entfällt die Notwendigkeit, während der Messung eine permanente Verbindung zwischen MAX5Dip und dem Host-PC aufrecht zu erhalten. Diese Lösung ist bezogen auf den mobilen Einsatz vergleichsweise flexibel, da keine externe Peripherie zur Konfiguration und Steuerung des Systems notwendig ist. Unter Berücksichtigung der im vorliegenden Echtzeitsystem anfallenden Datenmenge ist ein autonomer Betrieb bei einer Messdauer von weniger als 30 min problemlos möglich. Hierbei ist jedoch einschränkend zu beachten, dass die in Kapitel 6.2.1 vorgeschlagene Steuerung des Laserscanners in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit nutzbarer Satellitensignale in dieser Betriebsart nicht möglich ist. Zudem ist die Kommunikation mit dem Anwender vollständig über LED oder ein externes Display durchzuführen.

Für den Einsatz im vorliegenden Messsystem wurde aus diesen genannten Gründen die Steuerung über einen Host-PC vorgezogen. Die Messdatenerfassung erfolgt hierbei vollständig auf dem Echtzeitrechner, die Datenspeicherung hingegen auf dem angeschlossenen Host-PC.

6.3.3 Erfassung digitaler Signale

Die Darstellung logischer Zustände erfolgt in der Elektrotechnik mit Hilfe von Logikpegeln, denen die binären Werte 1 oder 0 zugeordnet werden können. Logische Pegel werden in der Regel über Gleichspannungswerte realisiert, die innerhalb festgelegter Grenzen variieren können. Die Grenzwerte werden durch den Typ des Pegels bestimmt. Bedingt durch die bei der Fertigung von elektronischen Bauteilen auftretenden Toleranzen sind Bereiche festzulegen, die als High- und Low-Pegel bezeichnet werden. Eine Änderung des vorliegenden Logikzustands wird durch Überschreiten des High-Pegels oder Unterschreiten des Low-Pegels hervorgerufen, wobei Spannungswerte zwischen High- und Low-Pegel zu vermeiden sind, da sie zu undefinierten Zuständen an der Schnittstelle führen (Lindner u. a., 2004):

$$\begin{aligned} &\text{High-Pegel: } U \geq U_{H\ min} \\ &\text{Low-Pegel: } \ U \leq U_{L\ max} \end{aligned} \tag{6.7}$$

Der Abstand von High- und Low-Pegel wird hierbei als Übertragungsweite W, die Pegeldifferenzen zwischen Ein- und Ausgangspegel als Störabstände M_H und M_L bezeichnet. Abbildung 6.23 zeigt die Grenzwerte und die Übertragungsweite des sogenannten TTL-Pegels (Transistor-Transistor-Logik-Pegel).

Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass der für eine Zustandsänderung verantwortliche Grenzwert davon abhängig ist, ob es sich um einen Ein- oder Ausgang handelt. Der Grund für die Einführung einer solchen Differenz ist in der Störanfälligkeit elektrischer Leitungen durch elektromagnetische Einflüsse und der damit einhergehenden Verschlechterung der Signalqualität begründet.

$$\begin{aligned} M_H &= U_{H\ min(Ausgang)} - U_{H\ min(Eingang)} \\ M_L &= U_{L\ max(Ausgang)} - U_{L\ max(Eingang)} \end{aligned} \tag{6.8}$$

Der Störabstand beträgt bei TTL-Pegeln standardmäßig 0.4 V, die am Ein- oder Ausgang anliegenden Dauerspannungen dürfen die maximalen Grenzwerte von +5.7 V nicht über- und von -0.7 V nicht unterschreiten.

Neben dem TTL-Pegel finden bei der Definition logischer Zustände auch die verschiedenen Varianten des CMOS Pegel Verwendung, deren Grenzwerte sich in der 5 V-Ausführung nur geringfügig von denen der TTL-Variante unterscheiden. Viele CMOS-Bausteine lassen jedoch auch Versorgungsspannungen von 10 V oder 15 V zu, bei denen sich die Grenzwerte für die Logikzustände entsprechend verschieben. Die High- und Low-Pegel der vorgestellten Typen können Tabelle 6.11 entnommen werden, wobei die jeweiligen Grenzwerte der Pegel herstellerbedingten Variationen unterliegen.

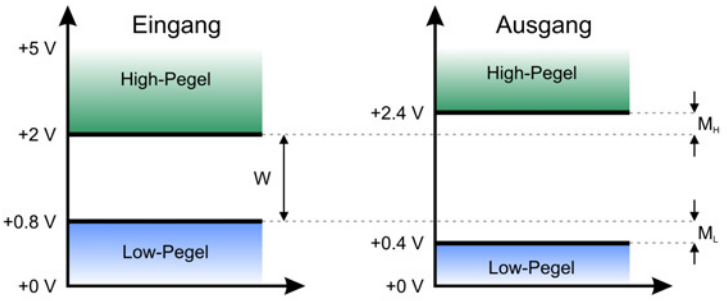


Abbildung 6.23: Toleranzbereiche für TTL-Logikpegel

In der Digitaltechnik werden die vorgestellten Logik-Pegel sowohl zur seriellen Datenübertragung (Kapitel 6.3.5) als auch zur Definition von Betriebszuständen an digitalen I/O-Schnittstellen verwendet. Bei der Kommunikation über serielle Schnittstellen werden die Daten binärcodiert und mit Hilfe aufeinanderfolgender serieller Rechteckimpulse zu einer Signalfolge verknüpft.

Pegel-Typ	**Eingang**		**Ausgang**		Quelle
	Low [V]	High [V]	Low [V]	High [V]	
TTL 5 V	0 - 0.8	2.0 - 5.0	< 0.4	> 2.4	
CMOS 5 V	0 - 1.5	3.0 - 5.0	< 0.05	> 4.95	(Philips, 1995)
CMOS 10 V	0 - 3.0	7.0 - 10.0	< 0.05	> 9.95	(Philips, 1995)
CMOS 15 V	0 - 4.0	11.0 - 15.0	< 0.05	> 14.95	(Philips, 1995)
LV-TTL: Low Voltage TTL					

Tabelle 6.11: Pegel digitaler I/O Schnittstellen

Optoentkoppelte Ein- und Ausgänge stellen eine Sonderform digitaler Schnittstellen dar, bei denen Ein- und Ausgangssignal vollständig potentialgetrennt sind. Der Grund für eine Potentialtrennung liegt in den unterschiedlichen Massen, die verschiedenartige Gerätegruppen häufig gegeneinander aufweisen. Hierdurch werden Potentialdifferenzen hervorgerufen, die gleich oder größer als die verwendeten Logikpegel sein können und somit zu fehlerhaften oder ausbleibenden Änderungen der Logikzustände führen.

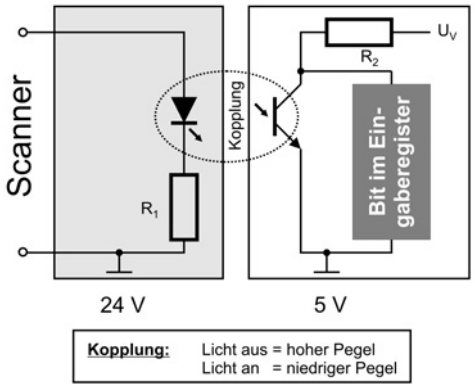


Abbildung 6.24: Pegelumsetzung

Die Übertragung des Eingangs- auf den Ausgangsstromkreis erfolgt bei optoentkoppelten Schnittstellen mit Hilfe eines lichtemittierenden und eines lichtempfangenden Elementes. Der lichtemittierende Teil wird standardmäßig durch eine LED gebildet, wohingegen für den lichtempfangenden Teil Fotodiode oder Fototransistor dienen können. Optokoppler eignen sich somit sowohl für analoge als auch digitale Schaltungen (Tietze und Schenk, 1991). Bedingt durch eine nichtlineare Diodenkennlinie wird in aller Regel ein Vorwiderstand verwendet, mit dessen Hilfe geregelt werden kann, ab welcher Eingangsspannung Strom durch die LED fließt und somit ein Wechsel des Logikzustands vollzogen wird (Abbildung 6.24). Aufgrund der galvanischen Trennung von Ein- und Ausgangssignal können High- und Low-Pegel von den in Tabelle 6.11 genannten Werten abweichen.

Wie in den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.4 gezeigt wird, muss das Messsystem geeignet sein, sowohl die Erfassung des PPS-Signals als auch des Synchronisierungssignals des Laserscanners vorzunehmen. Der PPS-Puls ist hierbei als TTL-Variante mit $U_H = 5$ V, das Rechtecksignal des Scanners hingegen in Form eines sogenannten Prozesspegels mit $U_H = 24$ V realisiert.

Da beide Sensoren eine eigene Spannungsquelle und somit auch unterschiedliche Systemmassen besitzen, ist darauf zu achten, dass die zu erfassenden Spannungswerte auf eine gemeinsame Masse bezogen werden. Im Rahmen empirischer Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die anliegenden Signale ohne einen gemeinsamen Masseanschluss zum Teil fehlerhaft erfasst werden. Insbesondere bei den für das Gesamtsystem zeitkritischen PPS-Signalen (Kapitel 6.2.1) sind standardkonforme Signalpegel zu gewährleisten. Auch bei der zeitlichen Zuordnung der einzelnen Laserscannerprofile (Kapitel 6.2.4) ist eine zuverlässige Signalerfassung sicherzustellen, um Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung der Profilmessungen zu vermeiden.

Sorcus bietet für die Erfassung und Ausgabe von digitalen Signalen sowohl CMOS- und TTL-fähige Module in der Baureihe „X-DIO“ als auch optoentkoppelte Schnittstellen mit der Modellbezeichnung „X-OPT“ an. Für die Ermittlung der Reaktionszeit des Gesamtsystems, die im Rahmen der Kalibrierung durchzuführen ist (Kapitel 7.6.2), wird eine gleichzeitige Verfügbarkeit von digitalen Ein- und Ausgängen vorausgesetzt.

Aus diesem Grund wurde das X-OPT128-Modul ausgewählt (Abbildung 6.25), das 12 Eingänge sowie acht Ausgänge besitzt und in zwei Schnittstellenausführungen lieferbar ist. Die L-Variante ist zur Erfassung von TTL-Pegeln geeignet, wohingegen die mit dem Buchstaben P bezeichnete Version auf die Erfassung von Prozesspegeln ausgerichtet ist (Tabelle 6.12).

Aufgrund der Tatsache, dass sowohl der 5 V-TTL-Pegel des PPS-Signals als auch der 24 V-Prozesspegel zur Synchronisierung der Scanprofile zu erfassen sind, ist das TTL-fähige Modul vorzuziehen. Zwar liegt der High-Pegel des Laserscannersignals mit 24 V deutlich über der maximalen Flankenhöhe der Modulschnittstelle, jedoch kann das Synchronisierungssignal mit Hilfe eines in Abbildung 6.24 gezeigten Pegelumsetzers auf den zulässigen Eingangsbereich transformiert werden.

Abbildung 6.25: X-OPT-128/L (Sorcus GmbH, 2006)

Zur präzisen Erfassung der Flanken aller Eingangssignale ist die Interruptfähigkeit der Erfassungshardware entscheidend, die jedoch von allen Modulen der X-OPT-Serie beherrscht wird. Über sogenannte Callback-Funktionen (Kapitel 8.3.3) können nach Auslösung eines Interrupts (Triggerung) beliebige Unterprogramme auf den CPU-Modulen der Trägerplattform ausgeführt werden, die eine Zeitreferenzierung und Speicherung der Signale vornehmen. Die Triggerung kann in diesem Fall sowohl auf der steigenden als auch auf der fallenden Signalflanke erfolgen.

Pegel-Typ	**Eingang**			**Ausgang**	
	Low	High	Max	Low	High
TTL-Pegel	< 2.2 V	> 4.0 V	± 18 V	< 0.4 V	< 70 V
Prozesspegel	< 5.0 V	> 13.0 V	± 30 V	< 0.4 V	< 70 V

Tabelle 6.12: Eingangsbereiche der X-OPT-io-Module

6.3.4 Erfassung analoger Signale

Die messtechnische Erfassung analoger Signale erfolgt in der Regel durch Umwandlung einer analogen Eingangsspannung in einen dazu proportionalen Binärwert. Die verfügbaren A/D-Wandler unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Geschwindigkeit der Wandlung, die mögliche Auflösung und den zugelassenen Wertebereich des Eingangssignal sowie die damit einhergehende Unterscheidung zwischen uni- und bipolarem Messbereich. Die Auflösung des Wandlungsbausteins bestimmt in Verbindung mit seinem Messbereich die kleinste detektierbare Änderung des Eingangssignals.

Die Eingänge von AD-Wandlern können zudem in massebezogene Eingänge und Differenzeingänge unterschieden werden (Wörn und Brinkschulte, 2005). Bei massebezogenen Eingängen erfolgt die Spannungsmessung gegenüber einem Bezugspunkt, der in der Regel durch die Masse der Signalquelle gebildet wird. Aus diesem Grund bestehen Eingänge dieses Typs immer aus Signal- und Masseeingang. Sind mehrere Signalquellen mit unterschiedlichen Massen in einem gemeinsamen System zu erfassen, so sollten diese möglichst nah am Masseeingang des Messsystems zusammengeführt werden.

Bei Differenzeingängen erfolgt dagegen eine Bestimmung der zwischen zwei oder mehreren Signalquellen mit gemeinsamer Masse liegenden Spannungsdifferenz. Hierzu werden mindestens zwei Signaleingänge sowie ein gemeinsamer Masseeingang benötigt, an den die Systemmassen der Signalquellen angeschlossen werden. Differenzeingänge sind verglichen mit Masseeingängen weniger verbreitet, werden jedoch im Bereich der geodätischen Messtechnik gelegentlich zur Umsetzung von Inklinometerschnittstellen verwendet.

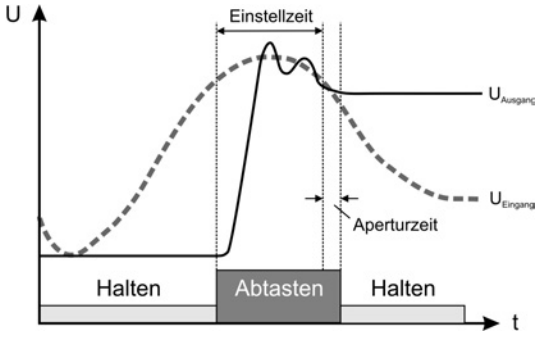


Abbildung 6.26: Sample-And-Hold Vorgang

Abbildung 6.27: X-AD 12/16
(Sorcus GmbH, 2006)

Die meisten Verfahren zur Analog-Digital-Umsetzung benötigen für den Zeitraum der Wandlung einen konstanten Spannungswert, um Digitalisierungsfehler zu vermeiden. Hierzu wird ein sogenannter „Sample-And-Hold“-Baustein verwendet (Abbildung 6.26), der dafür sorgt, dass der vorliegende Spannungswert für die Dauer der Wandlung innerhalb enger Grenzen unverändert bleibt.

Sollen bei einem Messsystem mehrere analoge Signale über ein gemeinsames Wandlungsmodul erfasst werden, so wird zusätzlich zum Sample-And-Hold-Baustein ein Multiplexer eingesetzt, der die verschiedenen Eingänge während der Erfassung auf den gemeinsamen AD-Wandler schaltet. Nach einer erfolgten Umschaltung benötigt die Sample-And-Hold-Baugruppe zunächst eine kurze Zeitspanne, um auf die jeweilige Eingangsspannung einzuschwingen. Diese Zeitspanne wird als „Settle-Time“ bezeichnet und liegt im Bereich einiger Mikrosekunden. Diese Besonderheit ist zu beachten, wenn mehrere Eingänge mit verschiedenen Spannungsbereichen gleichzeitig erfasst werden sollen.

Aufgrund der Tatsache, dass das verwendete Inklinometer sowohl mit massebezogenem als auch differentiellem Anschluss lieferbar ist, kommt im vorliegenden System das Analog-Digital-Modul X-AD12-16 (Abbildung 6.27) zum Einsatz, dessen Schnittstellen in zwei Spannungsbereichen betrieben werden können.

Im Hinblick auf die notwendige Auflösung erfolgt eine Digitalisierung mit einer nominellen Wandlungsbreite von 12 Bit, die jedoch modulintern mit 14 Bit realisiert wird. Somit können Spannungen von bis zu 0.6 mV im Bereich von ±2.5 V sowie 2.4 mV bei ein Eingangsbereich von ±10.0 V aufgelöst werden.

Unter Berücksichtigung der Übertragungsfunktion der elektronischen Libelle, die einen Umrechnungsfaktor von 60 mV/° besitzt, ergibt sich für das vorliegende Modul eine äquivalente Auflösung der A/D-Wandlung im 2.5 V-Spannungsbereich von 2.78 mgon. Bezogen auf die angestrebte Messentfernung von 20 m entspricht dies einer Auflösung im Objektraum von 3.5 mm. Die weiteren technischen Daten können Tabelle 6.13 entnommen werden.

Parameter	**X-AD12-16/L**
Eingänge (Masse/Differenz)	16 (•/•)
Spannungsbereiche	$\pm 10.0V$; $\pm 2.5V$
Auflösung	12 Bit
- bezogen auf ±10 V	0.6 mV
- bezogen auf ±2.5 V	0.15 mV
Abtastrate	0.8 Msps

Tabelle 6.13: Leistungsdaten des X-AD12-16/L-Moduls

6.3.5 Serielle Datenerfassung

Serielle Schnittstellen finden in der Informationstechnologie und im industriellen Umfeld große Verbreitung zur Realisierung einer dezentralen Systemstruktur. Der in Europa und den USA unter dem Namen RS-232 bekannte Standard bezeichnet die am häufigsten verwendete serielle Schnittstellenspezifikation. Sie ist durch eine Reihe internationaler Standards hinsichtlich ihrer Signalstruktur, ihrer elektrischen Eigenschaften (DIN, 1999; ANSI, 1997) sowie der Pinbelegung ihrer Schnittstelle (ISO, 1989) normiert.

Die Übertragungsraten serieller Schnittstellen werden in Bit pro Sekunde gemessen und sind prinzipiell in Sende- und Empfangsrichtung unbegrenzt. Sie liegen bei aktuellen seriellen Schnittstellen in einem Bereich zwischen 300 und 460.800 Bit/s, wobei die gebräuchlichen Datenraten in der Regel Werte von $300 \cdot 2^n$ [Bit/s] annehmen. In diesem Zusammenhang ist jedoch die maximal zulässige Leitungslänge zu beachten, die von der Kapazität der verwendeten Leitung abhängig ist. Die Abhängigkeit der Übertragungsleistung von der Leitungskapazität resultiert aus dem Innenwiderstand des Sendebausteins, durch den der notwendige Zeitraum für die Umladung der Leitungskapazität abhängig von der Schnittstellengeschwindigkeit begrenzt wird. Somit können bei Verwendung von Leitungen mit sehr niedriger Kapazität durchaus größere Längen standardkonform überbrückt werden. Im Hinblick auf die in Mobile-Mapping-Systemen benötigten Leitungslängen von weniger als 10 m sind jedoch keine Einschränkungen der Übertragungsleistung zu erwarten.

Die elektrische Signalübertragung erfolgt bei seriellen Schnittstellentypen meist bipolar, das heißt mit positiven und negativen Betriebsspannungen gleicher Größe. Hierzu sind jeweils zwei Betriebsspannungen mit entgegengesetztem Vorzeichen notwendig, welche die logischen Zustände 1 (-25 V bis -3 V) und 0 (+3 V bis +25 V) definieren. Wie schon bei der Definition der TTL-Pegel in Kapitel 6.3.3 gilt auch für serielle Schnittstellen, dass das Spannungsintervall zwischen oberer und unterer Grenze, für die RS-232 zwischen +3 V und -3 V, nicht verwendet werden darf, da der Zustand in diesem Bereich undefiniert ist.

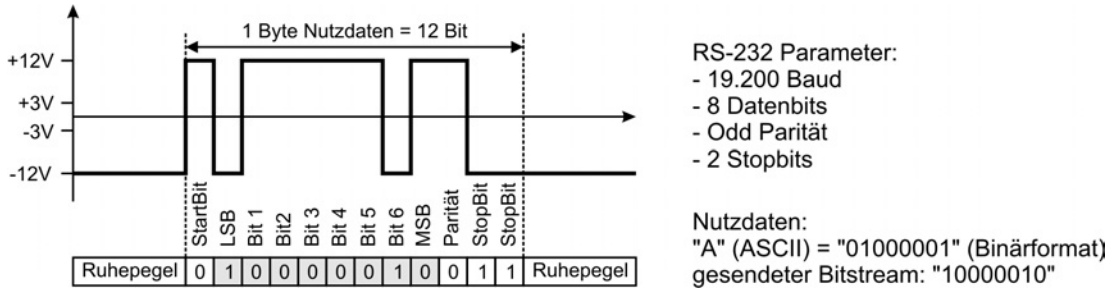


Abbildung 6.28: Bitweise Übertragung von Nutzdaten auf RS-232-Schnittstelle

In der Mehrzahl der Anwendungsfälle erfolgt die Datenübertragung über die RS-232-Schnittstellen in asynchroner Form. Hierbei können Daten vom Sender zum Empfänger geschickt werden, ohne dass die Schnittstelle vor und nach der Kommunikation für die Gegenseite blockiert ist.

Abbildung 6.28 zeigt den typischen Ablauf einer Übertragung von Nutzdaten über eine serielle RS-232-Schnittstelle. Vor Beginn der Übertragung wird ein sogenanntes Startbit in Form einer logischen 0 gesendet, gefolgt von fünf bis acht Datenbits, die mit dem niederwertigsten Bit (Least Significant Bit, LSB) beginnen und mit dem höchstwertigen Bit (Most Significant Bit, MSB) enden. Zur Aufdeckung von Übertragungsfehlern folgt optional ein sogenanntes „Paritätsbit“. Zum Abschluss einer Übertragung folgt mindestens ein obligatorisches Stoppbit.

Abbildung 6.29: X-COM4 (Sorcus GmbH, 2006)

Sorcus bietet insgesamt drei Module zur seriellen Datenkommunikation an, die sich durch die Anzahl der verfügbaren Schnittstellen sowie den unterstützten Standard unterscheiden. Die Erfassung der Temperatur- und Zeitdaten erfolgt bei diesem Prototypen mit Hilfe des X-COM4 Moduls (Abbildung 6.29), das vier asynchrone RS-232-Schnittstellen zur Datenkommunikation bereitstellt, von denen zwei auch im RS-422 oder RS-485 Standard betrieben werden können. Jede Schnittstelle besitzt eine Geschwindigkeit von 460.800 Baud pro Kanal sowie einen 16 Byte großen FIFO-Sende- und Empfangspuffer. Sowohl die Übertragungsgeschwindigkeit als auch Anzahl und Typ der Schnittstellen entsprechen hierbei den durch die Sensorik gestellten Anforderungen.

7 Prüfung und Kalibrierung der Komponenten

7.1 Ansätze zur Kalibrierung

7.1.1 Begriffliche Einordnung

Die konsequente Prüfung und Kalibrierung von Sensoren und Messsystemen ist grundlegende Voraussetzung zur Sicherung der Qualität von Messergebnissen und seit jeher integraler Bestandteil einer Messaufgabe. Aus diesem Grund sind die im nachfolgenden Kapitel vorgenommenen Betrachtungen zwar konkret auf das realisierte System ausgerichtet, können jedoch auch leicht auf allgemeine Fragestellungen hinsichtlich der Kalibrierung und Prüfung kinematischer Messsysteme und terrestrischer Laserscanner übertragen werden.

Bezogen auf den vorliegenden Themenkomplex werden häufig die Begriffe Prüfung und Untersuchung für Tätigkeiten verwendet, die im eigentlichen Sinne als Kalibrierung zu verstehen sind. Die Prüfung von Sensoren oder Messsystemen stellt in der Regel die Vorstufe einer Kalibrierung dar, auf deren Grundlage der erfasste Messwert auf systematische Abweichungen untersucht und eine Entscheidung zur Kalibrierung getroffen wird.

Eine grundlegende Sensorprüfung durch den Anwender sollte ohne räumliche und messtechnische Voraussetzungen durchführbar sein, wohingegen die Kalibrierung und Untersuchung von Instrumenten häufig unter Laborbedingungen und von Fachleuten mit speziellem Instrumentarium und Hilfsmitteln sowie einem Bezug zu Sollgrößen vorgenommen wird (Abbildung 7.1).

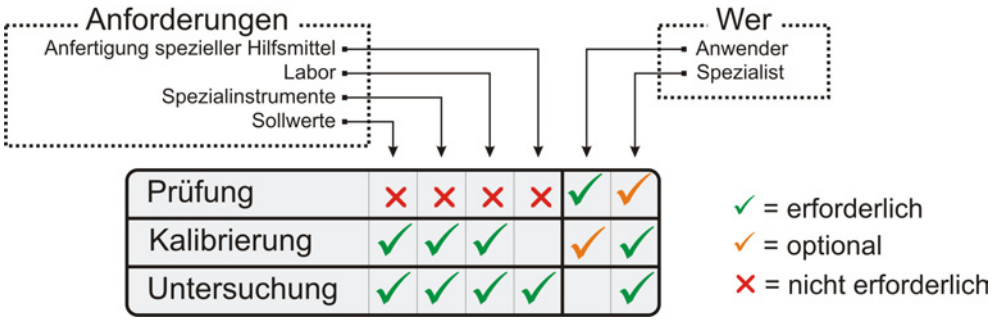


Abbildung 7.1: Prüfung, Kalibrierung und Untersuchung von Messsystemen (Staiger, 2001)

Nach Hennes und Ingensand (2000) ist unter einer Kalibrierung im Sinne der geodätischen Messtechnik die Ermittlung einer Korrekturfunktion

$$k = \boldsymbol{f}(x_1, x_2, x_3, ..., x_n), \quad \text{mit n: Anzahl der Einflussgrößen auf das Messergebnis} \tag{7.1}$$

für unbekannte oder unvollständig berücksichtigte systematische Abweichungen einer Messgröße von ihrem Sollwert zu verstehen. Ein solcher funktionaler Zusammenhang ist meist in linearer Form definiert und auf einzelne Komponenten des Systems bezogen. Die Korrekturfunktion wird nach abgeschlossener Kalibrierung zur Bestimmung des korrigierten Messergebnisses beziehungsweise der korrigierten Messgröße y_{korr} verwendet:

$$y_{korr} = y_M + k, \quad \text{mit } y_M\text{: unkorrigierte Messgröße} \tag{7.2}$$

Grundlage einer Kalibrierung können sowohl der von einem Messsystem erzeugte originäre Messwert als auch ein daraus abgeleitetes Ergebnis wie ein Koordinatenvektor sein. Ist es möglich, einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer oder mehreren Eingangsgrößen und der beobachteten Ausgangsgröße herzustellen, so sind die Kalibrierergebnisse analytisch nach Gleichung (7.1) in Form einer Korrekturfunktion anzubringen. Kann ein solcher Zusammenhang aufgrund fehlender Kenntnisse über das Systemverhalten jedoch nicht hergestellt werden, sind die unkorrigierten Messwerte mit Hilfe einer sogenannten „Look-Up-Table“ (LUT) zu korrigieren, bei der jedem möglichen Messwert ein oder mehrere Korrekturwerte zugewiesen werden (Abbildung 7.2). Der schematische Ablauf einer Kalibrierung ist in Abbildung 7.2 zu sehen.

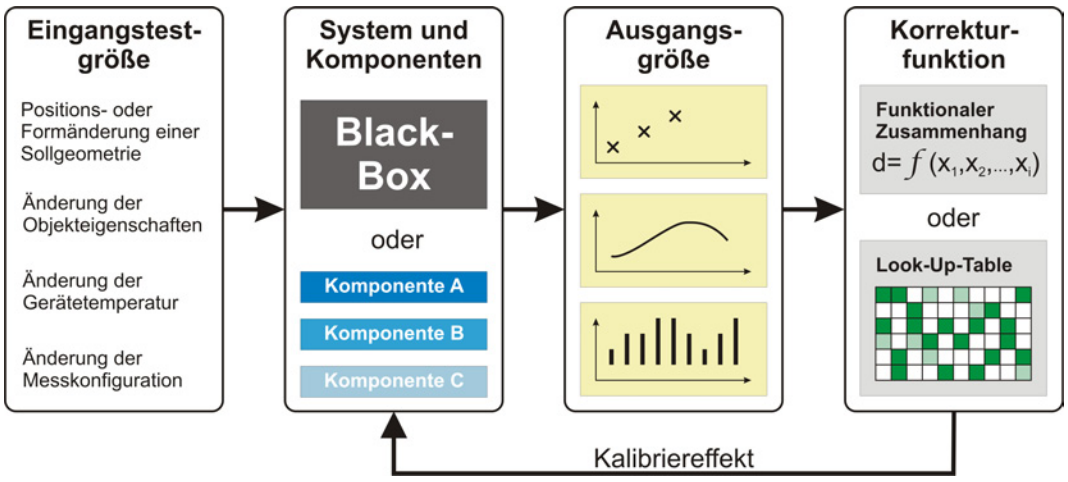


Abbildung 7.2: Prinzipskizze des geodätischen Kalibrierprozesses
(Hennes und Ingensand, 2000)

Unterbleibt eine vollständige Kalibrierung und somit die Elimination systematischer Messabweichungen, so gehen diese zusammen mit vorhandenen stochastischen Abweichungen in die Auswertung ein (Hennes und Ingensand, 2000). Die daraus entstehenden physikalischen Korrelationen können dazu führen, dass die Angabe der Messunsicherheit des Gesamtergebnisses durch nicht berücksichtigte Korrelationen zu optimistisch geschätzt wird. Generell sollte jede Art von Kalibrierung unter kontrollierten äußeren Bedingungen durchgeführt werden, so dass nicht modellierbare Störgrößen nur wenig Einfluss auf die Ergebnisgröße haben. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass die Frage, ob alle wesentlichen Einflussgrößen Berücksichtigung in einem Kalibrierprozess gefunden haben, häufig nicht abschließend beantwortet werden kann.

Eine durch Kalibrierung ermittelte Korrekturfunktion ist streng genommen nur für den Zeitpunkt t_{Kal} der Kalibrierung gültig. So weisen Brunner und Woschitz (2001) darauf hin, dass verschiedene Komponenten eines Messsystems zeitvariante Eigenschaften besitzen. Eine solche Änderung von Eigenschaften ist in aller Regel auf eine Vereinfachung des Korrekturmodells zurückzuführen und kann sowohl kurz- als auch langperiodischer Natur sein. Gordon u. a. (2001) berichten in diesem Zusammenhang von einer mittelbaren zeitlichen Veränderung der Kalibrierwerte für die Streckenmessung eines Cyrax 2400-Scanners, die von den Autoren auf Erschütterungen während des Transports zurückgeführt wird.

Vorgehensweise und Umfang einer Kalibrierung hängen wesentlich von der Art des Sensors, der Zugänglichkeit zu einzelnen Sensorkomponenten und dem Messergebnis ab. Bezüglich des Kalibrierverfahrens werden die Ansätze der System- oder Komponentenkalibrierung unterschieden, die in Kapitel 7.1.2 vorgestellt werden.

Während bei tachymetrischen Messungen diskrete Punkte als originäre Messgrößen erfasst werden, steht bei Laserscannermessungen meist die flächenhafte Erfassung von Objekten oder Objektteilen und deren anschließende Modellierung im Vordergrund. Aus diesem Grund können sowohl einzelne Sensorkomponenten als auch der gesamte Ablauf einer Laserscannermessung bestehend aus Scanning, Verknüpfung von Einzelscans, Segmentierung und Objektmodellierung das Ziel einer Kalibrierung sein. Hierbei ist es grundsätzlich möglich, auch die Mess- und Auswertesoftware für Laserscans einer Kalibrierung zu unterziehen.

7.1.2 System- und Komponentenkalibrierung

Die Struktur moderner geodätischer Messinstrumente, zu denen elektronische Tachymeter und Laserscanner zu zählen sind, kann durch das in Abbildung 7.3 dargestellte Schichtmodell beschrieben werden. Die verschiedenen Sensoren und Aktoren werden hierbei zu Komponenten und diese wiederum zu Modulen zusammengefasst.

Tabelle 7.1 zeigt die verschiedenen Systembestandteile am Beispiel eines terrestrischen Laserscanners. Die Zuordnung der einzelnen Elemente zu bestimmten Modulen oder Komponenten sollte jedoch nicht streng ausgelegt werden. So können Temperatursensoren (Sensor 1.2.A) zum Beispiel von mehreren Kom-

Ebene	Systembestandteil	Bezeichnung
1	Messsystem	Terrestrischer Laserscanner
2	Modul	Scanner, Notebook, Scan-Objekt, Software
3	Komponente	Distanzmessung, Richtungsmessung, Meteorologiekomponente, Software
4	Sensor	Phasenmesser, Laufzeitmesser, Temperatursensor

Tabelle 7.1: Schematischer Aufbau eines terrestrischen Laserscanners

ponenten genutzt werden oder Softwarealgorithmen sowohl auf Komponenten- als auch auf Modulebene zum Einsatz kommen.

Zur Festlegung von Art und Umfang einer Kalibrierung werden allgemein zwei Ansätze diskutiert: Die unabhängige Kalibrierung einzelner Komponenten (Komponentenkalibrierung) und die gesamtheitliche Kalibrierung eines vollständigen Messsystems (Systemkalibrierung). Die Wahl des zweckmäßigen Kalibrierverfahrens richtet sich in erster Linie nach folgenden Kriterien:

- Zugänglichkeit zu einzelnen Komponenten
- Ermittelbarkeit der Einflussgrößen (Eingangsgrößen) einzelner Komponenten
- Herstellbarkeit eines funktionalen Zusammenhangs zur angegebenen Messgröße

Bei der sogenannten Systemkalibrierung werden die von einem System ausgegebenen Messwerte unter praxisnahen Bedingungen im Vergleich zu Sollwerten, zum Beispiel bekannten Punktkoordinaten, betrachtet. Da die Systemkalibrierung das Messsystem in seiner Gesamtheit betrachtet, ist sie verglichen mit der Komponentenkalibrierung besser geeignet, eine umfassende Betrachtung der vorhandenen systematischen Abweichungen vorzunehmen. Im Rahmen der bereits erwähnten Entwicklung zu immer komplexeren Systemen ist eine Systemkalibrierung darüber hinaus messtechnisch einfacher umzusetzen. Hierbei wird das zu untersuchende System als sogenannte Black-Box (Abbildung 7.2) betrachtet, bei der eine Änderung der Messgröße (Ergebnisgröße) durch Variation einer oder mehrerer Eingangsgrößen herbeigeführt wird. Aus diesem Grund ist der direkte Zugang zu einzelnen Komponenten oder Sensoren in aller Regel nicht notwendig.

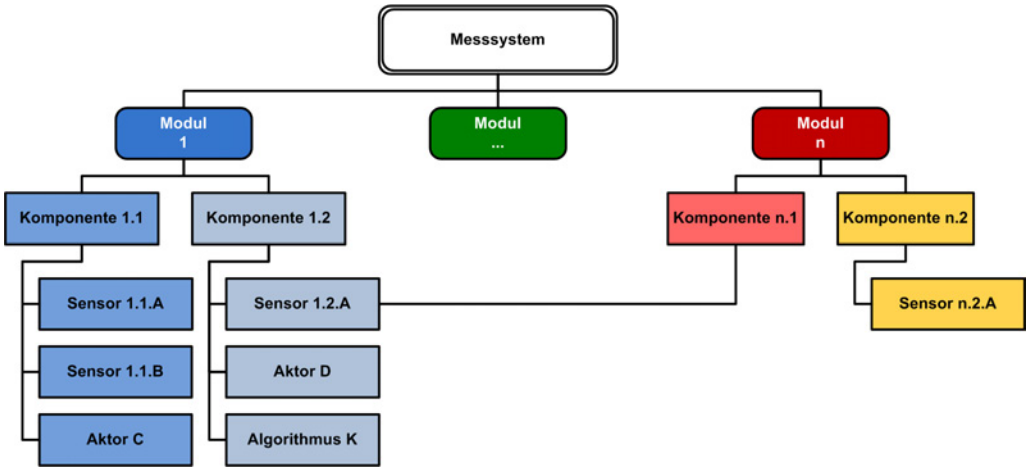


Abbildung 7.3: Grundaufbau eines Messsystems

Die Durchführung einer Systemkalibrierung ist nur dann sinnvoll, wenn zwei Randbedingungen vorausgesetzt werden können. Die erste ist die Unveränderlichkeit des Systems hinsichtlich seiner Komponenten. Erfolgt zum Beispiel die Systemkalibrierung eines Laserscanners mit einheitlichen Zielmarken oder bestimmten Materialien, so gelten die ermittelten Kalibrierparameter und funktionalen Zusammenhänge ausschließlich für die vorliegende Konfiguration. Die Voraussetzungen einer gleichbleibenden Konfiguration von Scanner und Objekteigenschaften sind jedoch insbesondere bei kinematisch bewegten Laserscannern nicht gegeben.

Die zweite und wesentlich schwerwiegendere Voraussetzung bezieht sich auf die Tatsache, dass eine Ergebnisgröße häufig von einer Vielzahl von Eingangsgrößen beeinflusst wird. Diese Eingangsgrößen müssen

für eine Kalibrierung zugänglich und ihre Abhängigkeit von der Ergebnisgröße muss durch funktionale Zusammenhänge formulierbar sein. Bei modernen Sensoren wie terrestrischen Laserscannern kann der überwiegende Teil dieser Größen weder bestimmt noch kann der in einer Korrekturfunktion formulierte Zusammenhang aufgrund sensorinterner Wechselwirkungen exakt ermittelt werden (Staiger, 2005a).

Darüber hinaus müssen die verschiedenen Eingangsgrößen allgemein im Rahmen einer Kalibrierung in einem ausreichend großen Intervall variiert werden können. Schwarz (2001) führt am Beispiel der Systemkalibrierung von Tachymetern aus, dass aufgrund der hohen Messgenauigkeit der Komponenten eine Ableitung von genauigkeitssteigernden Korrektionen aus Netzbeobachtungen allein nicht mehr durchführbar ist. Durch diese Art der Systemkalibrierung ist lediglich eine Prüfung des Messsystems auf Gültigkeit der angegebenen Genauigkeitsmaße möglich. Eine solche Einschränkung kann auch im Hinblick auf die Systemkalibrierung von Laserscannern formuliert werden, da diese Sensorsysteme eine noch höhere Komplexität besitzen und Ausgangsgrößen darüber hinaus bereits von der Systemsoftware mit Korrektionen versehen werden.

Im Gegensatz zur Systemkalibrierung wird bei einer Komponentenkalibrierung der Ansatz verfolgt, alle Komponenten eines Messsystems und ihre relevanten Einflussgrößen soweit möglich isoliert zu betrachten (Staiger, 2001). Die Komponentenkalibrierung sollte aus diesem Grund komponenten- und nicht modulbezogen sein, um eine klare Trennung der systematischen Abweichungen zu erreichen, die auf eine Ergebnisgröße wirken. Die für eine Kalibrierung verwendeten Messverfahren sind in der Praxis trotz der abweichenden Zielsetzung vielfach mit denen der Systemkalibrierung identisch, wobei die Komponentenkalibrierung häufig unter Laborbedingungen stattfindet. Hennes und Ingensand (2000) vertreten darüber hinaus die Meinung, dass auch die Systemkalibrierung innerhalb einer Laborumgebung oder zumindest unter kontrollierten Umgebungsbedingungen durchzuführen ist, um eine Trennbarkeit der Einflussgrößen herbeiführen zu können.

Auch bei Komponentenkalibrierungen ist die gesonderte Betrachtung des Einflusses einzelner Eingangsgrößen auf die Komponenten aufgrund der hohen Komplexität eines Systems nicht immer möglich. Die Gründe liegen wie bereits beschrieben in der vielfach nicht gegebenen Zugänglichkeit zu einzelnen Komponenten und Sensoren, der fehlenden Verfügbarkeit originärer Messergebnisse sowie in der Tatsache begründet, dass die verfügbaren Ausgangsgrößen bereits mit einer Vielzahl von Korrekturwerten überlagert sind, die vom Hersteller ermittelt wurden.

Idealerweise werden im Rahmen einer Kalibrierung die Vorteile von System- und Komponentenkalibrierung kombiniert. Hennes und Ingensand (2000) schlagen hierzu den in Abbildung 7.4 dargestellten Ablauf unter Einbeziehung von Komponenten- und Systemkalibrierung vor.

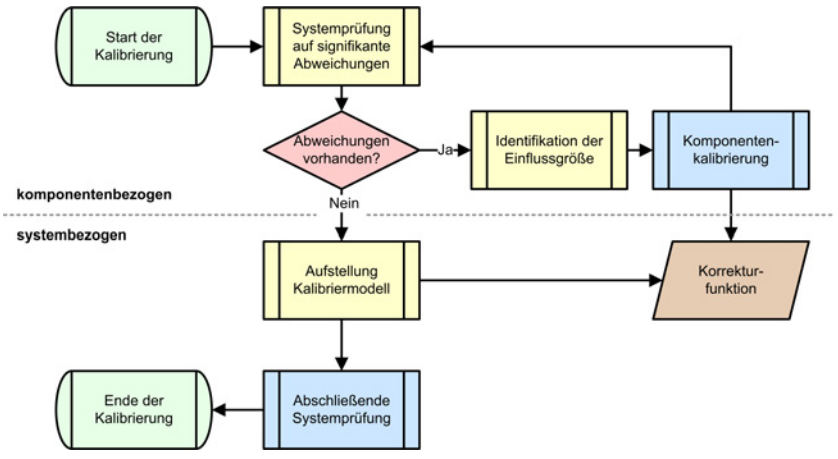


Abbildung 7.4: Kombination von Komponenten- und Systemkalibrierung

Hierbei erfolgt zunächst eine Systemprüfung, um vorhandene Abweichungen der Ergebnisgröße vom Sollwert aufzudecken. Bei festgestellten Differenzen werden die verschiedenen Eingangsgrößen nacheinander getrennt, um ihren Einfluss auf die Ergebnisgrößen im Zuge einer Komponentenkalibrierung zu bestimmen und durch eine Korrekturfunktion zu eliminieren. Die Kalibrierbarkeit des gesamten Systems hängt somit davon ab, ob Abweichungen derjenigen Einflussgröße zugeordnet werden können, die einen systematischen Effekt verursacht. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse kann, falls die systematischen

Abweichungen mit Hilfe der vorgenommenen Komponentenkalibrierung vollständig beschrieben werden konnten, eine Prüfung auf Systemebene durchgeführt werden.

7.2 Ermittlung des Kalibrierumfangs

7.2.1 Vereinfachende Annahmen

Im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung sind prinzipiell alle Sensoren sowie das verwendete Fahrzeug einer Prüfung zu unterziehen, um auftretende systematische Effekte, die im Laufe der Messung und Messdatenverarbeitung auftreten, zu bestimmen und im Rahmen einer Kalibrierung zu kompensieren.

Um den Prüf- und Kalibrieraufwand für das vorliegende System zu begrenzen, sollen jedoch folgende Vereinfachungen getroffen werden:

1. Annahme von Zeitinvarianz für die ermittelten systematischen Abweichungen
2. Beschränkung der Untersuchungen auf folgende Systemkomponenten
   - Achsen
   - Nullpunkt
   - Maßstab
   - Temperatur
3. Betrachtung systematischer Effekte aufgrund von
   - Achsabweichungen
   - Nullpunktsabweichungen
   - Maßstabsabweichungen
   - Temperatureinflüssen
4. Ausschließliche Berücksichtigung von Abweichungen, die wesentliche Auswirkung auf die Genauigkeit der Objektpunktbestimmung haben
5. Änderungen der internen Sensorgeometrie und Ausrichtung der Sensoren zueinander werden vernachlässigt

Der verwendete Quat-Temperatursensor wird zur Erfassung der Umgebungstemperatur eingesetzt und bietet eine vom Hersteller angegebene Genauigkeit von besser als 0.1 K im relevanten Messbereich (Kapitel 6.2.3). Da die mit diesem Sensor bestimmten Temperaturwerte zur Korrektion systematischer Abweichungen der Neigungsmessung verwendet werden, können alle systematischen Abweichungen der Temperaturmessung, deren kumulierter Einfluss kleiner als 1° C ist, vernachlässigt werden. Ausgehend von der Annahme, dass die unberücksichtigten Restabweichungen kleiner als dieser Wert sind, ist eine Beeinflussung der Ergebnisgröße des Gesamtsystems nicht zu erwarten und eine Kalibrierung somit nicht notwendig.

Bei der Positionsbestimmung mit differentiellen GPS-Verfahren kommen eine Reihe von Einflussgrößen in Frage, die zur Entstehung systematischer Abweichungen führen können. Hier sind in erster Linie Mehrwegeffekte (Multi-Path) sowie eine fehlerhafte Bestimmung der Antennenphasenzentren zu nennen. Mehrwegeffekte sind in erster Linie ortsabhängig und können aus diesem Grund in einem kinematischen Messsystem, das entlang größerer Streckenabschnitte bewegt wird, nicht mit vertretbarem Aufwand berücksichtigt werden. Die Ermittlung von Variationen des Antennenphasenzentrums in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Antenne ist zwar grundsätzlich möglich, jedoch ist die zu erwartende Standardabweichung einer Einzelpositionierung mit GPS deutlich größer als der Effekt, der durch eine Abweichung des Phasenzentrums hervorgerufen wird. In Anbetracht der zu erwartenden Variationen von wenigen Millimetern soll eine Kalibrierung in der vorliegenden Arbeit unterbleiben.

Demgegenüber ist die in Kapitel 7.4 diskutierte Kalibrierung von Neigungssensor und Laserscanner ausgehend von Erfahrungswerten sowie vor dem Hintergrund der Genauigkeitsanforderungen an den konzipierten Prototypen angebracht. Zudem kann sie mit vergleichsweise einfachen Mitteln durchgeführt werden. Auch eine Bestimmung der Fahrzeugachsen und der damit einhergehenden Ermittlung systematischer Abweichungen ist für eine Festlegung des Fahrzeugkoordinatensystem obligatorisch.

Eine strenge Klassifizierung der angewandten Prüf-, Justier- und Kalibrierarbeiten ist schwierig, weil es sich bei den verwendeten Sensoren um ein-, zwei- und dreidimensional messende Instrumente handelt und verschiedene systematische Abweichungen in allen Dimensionen auftreten können. Dennoch erscheint aus Gründen der Übersicht eine tabellarische Darstellung der durchgeführten Arbeiten sinnvoll (Tabelle 7.2).

	Fahrzeug	Scanner	Inklinometer	GPS	Echtzeit-PC
Position	7.5	7.5	-	7.5	-
Orientierung	3.7.3	7.5.2	-	-	-
Kalibrierung					
Achsen	7.5	7.3.2	-	-	-
Nullpunkt	-	7.3.1	7.4.1	-	-
Maßstab	-	7.3.1	7.4.1	-	7.6.1
Temperatur	-	7.3.3	7.4.2	-	-
Datenprüfung	-	9.2.2	7.4.2	9.2.1, 9.2.2	7.6.2

Tabelle 7.2: Kapitelübersicht der Prüf-, Justier- und Kalibrierarbeiten

Untersuchungen über die Langzeitstabilität der verwendeten Sensoren wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen, obwohl verschiedene Publikationen zu diesem Thema eine Zeitvarianz von Kalibrierparametern vermuten lassen (Clark und Robson, 2004).

Des Weiteren wurden eine Reihe von Kalibrierungen nicht vorgenommen, die eigentlich zum Standardumfang geodätischer Instrumentenuntersuchungen gehören. Dies ist zum Beispiel die Nullpunkt- und Maßstabsbestimmung der Distanzkomponente des Laserscanners, die ebenso wie andere Untersuchungen bereits mehrfach an baugleichen Geräten durchgeführt wurde. Im Rahmen solcher Untersuchungen traten jedoch keine Abweichungen auf, die für den angestrebten Genauigkeitsbereich dieses Systems als relevant angesehen werden. Für eine weitergehende Diskussion der notwendigen Kalibrierungen des Laserscanners sei an dieser Stelle auf das nachfolgende Kapitel 7.2.2 verwiesen.

Auch in diesem Fall besteht die Wahl zwischen den in Kapitel 7.1.2 diskutierten Ansätzen der System- und Komponentenkalibrierung. Speziell im Fall des Laserscanners verhindern die nicht gegebene Zugänglichkeit zu den Baugruppen, die bereits im Gerät angebrachten Korrektionen sowie die fehlende Ausgabe von Rohdaten eine durchgreifende Komponentenkalibrierung.

7.2.2 Ansätze zur Kalibrierung von Laserscannern

Bedingt durch die große Ähnlichkeit zwischen terrestrischen Laserscannern und elektronischen Tachymetern existieren eine Reihe von Verfahren, die für eine Prüfung oder Kalibrierung dieser Sensoren grundsätzlich in Frage kommen. Bei der konkreten Übertragung von Kalibrierverfahren für tachymetrische Instrumente auf Laserscanner ist jedoch zu beachten, dass eine Objektaufnahme mit Laserscannern ausschließlich rasterförmig und nicht mit Hilfe diskreter Punkte erfolgt.

Insbesondere die fehlende Möglichkeit zur wiederholten Anzielung identischer Punkte erschwert die Kalibrierung von Laserscannern. Zur praktischen Durchführung einer Kalibrierung ist somit die Diskretisierung von Vergleichsgrößen mit Hilfe geometrischer Formen notwendig, aus denen die Kalibriergrößen indirekt abgeleitet werden können. Abhängig von der Art der zu kalibrierenden Parameter werden hierzu häufig ebene Zielmarken (Schäfer und Schulz, 2005), Kugeln mit bekanntem Radius (Kersten u. a., 2004) oder auch Zylinder verwendet (Büttner und Staiger, 2007).

Das in Abbildung 7.3 gezeigte Schema für den Aufbaus eines Multi-Sensor-Systems kann ohne Einschränkung auch auf terrestrische Laserscanner übertragen werden. Im Vergleich zu Tachymetern besteht das endgültige Messergebnis bei Laserscannern jedoch nicht nur aus originären Strecken- und Winkelmessungen, sondern aus einer mit Regelgeometrien approximierten Punktwolke (Abbildung 1.2).

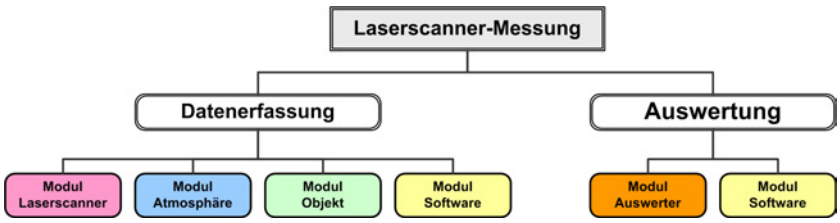


Abbildung 7.5: Am Ergebnis einer Laserscanneraufnahme beteiligte Module

Somit erscheint es sinnvoll, die zur Bereitstellung des Messergebnisses notwendigen Module in die beiden Kategorien „Datenerfassung“ und „Auswertung“ zu unterteilen (Abbildung 7.5). Aus Gründen

der Vereinfachung sollen die folgenden Betrachtungen jedoch auf diejenigen Module beschränkt werden, die zur Erfassung der Punktwolke beitragen.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass eine Kalibrierung der Auswerte- und Modellierungssoftware zwar grundsätzlich möglich, bedingt durch die fehlende Zugänglichkeit zu den verwendeten Algorithmen und Korrekturmodellen jedoch praktisch nur schwer umsetzbar ist. So weist Menger (2005) exemplarisch nach, dass einige Verfahren zur Approximation geometrischer Formen keine deterministischen Ergebnisse liefern, da sie zur Ausgleichung von Regelgeometrien aus Geschwindigkeitsgründen nur eine Untermenge der Punktwolke verwenden, deren Selektion auf Basis von Zufallszahlen geschieht. Auch eine Kalibrierung der Komponente „Auswerter“ ist durch die Abhängigkeit von Einzelpersonen nur sehr verallgemeinert möglich und soll im Rahmen dieser Arbeit unbetrachtet bleiben.

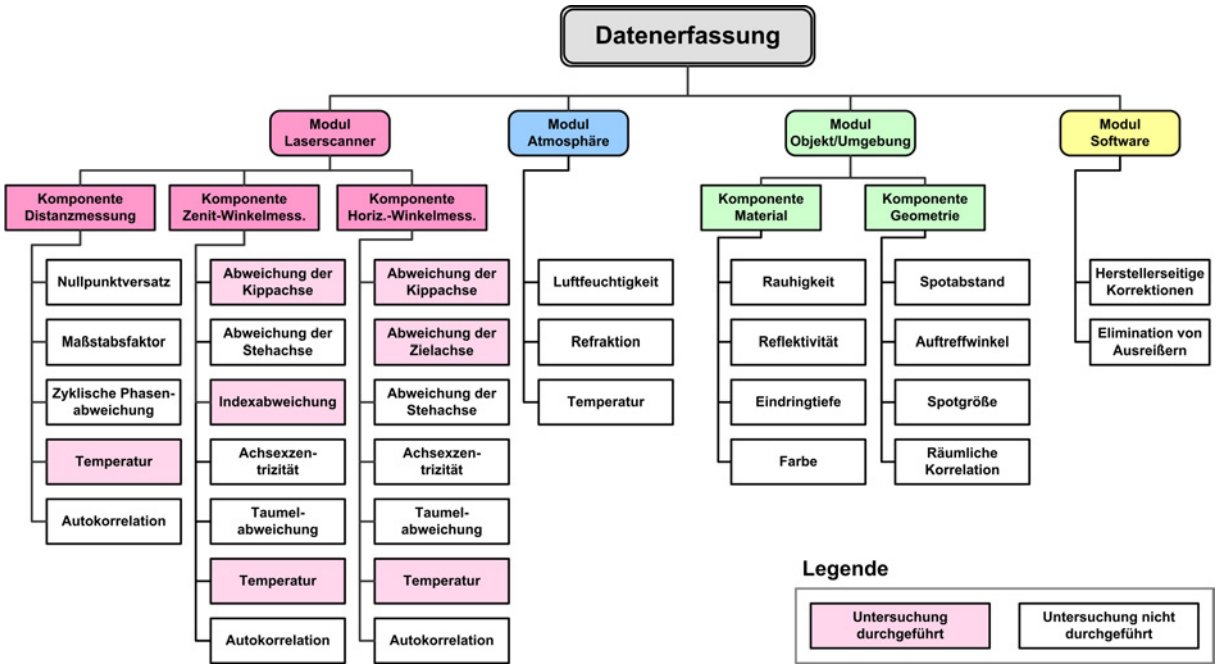


Abbildung 7.6: Einflussgrößen der verschiedenen Laserscannerkomponenten

Die Messdatenerfassung mit terrestrischen Laserscannern wird grundsätzlich von Komponenten ausgeführt, die den Modulen „Laserscanner“, „Atmosphäre“, „Objekt“ und „Software“ zugeordnet werden können. Abweichend zu Abbildung 7.3 wird an dieser Stelle jedoch keine funktions-, sondern eine kalibrierbezogene Darstellungsweise gewählt. Somit erfolgt eine Schematisierung nicht durch einzelne Sensoren und Aktoren, sondern durch die auf das Messergebnis wirkenden Einflussgrößen und systematischen Abweichungen (Abbildung 7.6). Eine solche Betrachtung erscheint vorteilhaft, da der exakte Systemaufbau eines Laserscanners aufgrund seiner hohen Komplexität nur näherungsweise beschrieben werden kann.

Ausgehend von der bereits thematisierten Ähnlichkeit zu Tachymetern werden zur Prüfung und Kalibrierung der Komponente „Distanzmessung“ in der Fachliteratur bislang überwiegend Verfahren vorgestellt, die bereits von elektronischen Distanzmessern (EDM) bekannt sind und fast ausschließlich als Komponentenkalibrierungen umgesetzt werden.

So erfolgt eine Kalibrierung der Distanzmessung bei Laserscannern mit Reichweiten von mehr als 100 m häufig auf EDM-Kalibrierstrecken (Kersten u. a., 2004), (Iavarone und Martin, 2003) oder im Rahmen von Netzbeobachtungen (Schäfer und Schulz, 2005), (Lichti u. a., 2001). Neben den auf den Außenbereich beschränkten Verfahren wurden auch zahlreiche Kalibrierungen auf interferometrischen Laborstrecken durchgeführt. Beispielhaft seien hier die Arbeiten von Ingensand (2006), Schulz und Ingensand (2004a), Santala und Joala (2003) und Cheok u. a. (2002) genannt. Menger (2005) sowie in Ansätzen auch (Kersten u. a., 2004) und (Lichti u. a., 2001) verwenden darüber hinaus auch dreidimensionale Testfelder zur Ermittlung der unbekannten Parameter.

Die Festlegung des notwendigen Kalibrierumfangs der Distanzkomponente hängt ganz wesentlich vom verwendeten Scanner und somit auch vom zugrundeliegenden Verfahren der Entfernungsmessung ab. Während bei Scannern mit Impulslaufzeitmessung Abweichungen von mehreren Zentimetern festgestellt wurden (Boehler u. a., 2003), liegen die Differenzen zum Sollwert beim verwendeten Imager 5003 im

Bereich weniger Millimeter, wie die umfangreichen Untersuchungen von Ingensand (2006) zeigen. Dies ist vor allem auf kontinuierliche Verbesserungen der Systemhardware und die Überarbeitung von Korrekturmodellen zurückzuführen, die vom Hersteller aufgrund veröffentlichter Instrumentenuntersuchungen und Kalibrierungen vorgenommen wurden.

Im Rahmen von ausführlichen Untersuchungen eines Laserscanners mit Impulslaufzeitmessung, die am Geodätischen Institut der Leibniz Universität Hannover durchgeführt wurden, konnte ein signifikanter Temperatureinfluss auf die Distanz- und Winkelmessung bestimmt werden.

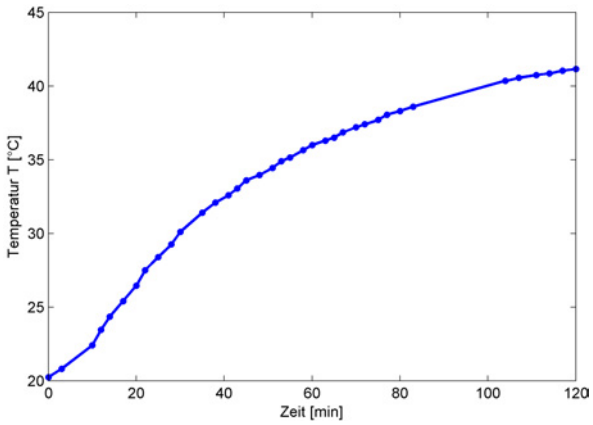


Abbildung 7.7: Temperaturverlauf im Inneren eines TOF-Scanners

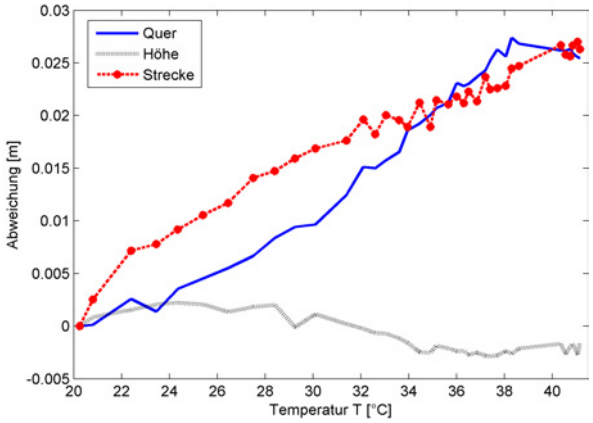


Abbildung 7.8: Abweichungen in Quer-, Hoch- und Zielrichtung

Beispielhaft zeigt Abbildung 7.7 den Verlauf der Innentemperatur des Time-of-Flight-Scanners (TOF) während eines Dauerscans von 120 min Länge. Hierbei nimmt die Geräteinnentemperatur um mehr als 20° C zu und erwärmt wesentliche Teile der optischen Ablenkeinrichtung sowie verschiedene Bauteile im Scannerinneren, so dass eine in 50 m Entfernung auf einem Messpfeiler fixierte Zielmarke im Koordinatensystem des Scanners zu wandern scheint. In Quer- und Längsrichtung ist eine Bewegung um mehr als 2.5 cm zu erkennen, während die Höhenkomponente nur unwesentlich beeinflusst wird.

Im Hinblick auf die vergleichsweise hohe Leistungsaufnahme, die bei aktuellen Geräten zwischen 70 W (Imager 5003) und 94 W (Riegl LMS-Z390) liegt, ist der Einfluss der Scannertemperatur auf die Komponenten des Moduls Laserscanner zu prüfen (Kapitel 7.3.3).

Wie bereits bei der Komponente Distanzmessung sind auch bei der Kalibrierung der horizontalen und vertikalen Winkelmesseinrichtung die notwendigen Bestimmungselemente indirekt aus den Mittelpunkten von Sollgeometrien oder Zielmarken abzuleiten.

Mit Ausnahme der Gruppe der Triangulationsscanner besitzen terrestrische Laserscanner drei orthogonal zueinander angeordnete Achsen. Diese sollen im Folgenden analog zu tachymetrischen Instrumenten als Stehachse, Kippachse und Zielachse bezeichnet werden. Tabelle 7.3 zeigt die verschiedenen Einflussgrößen auf die Winkelmessung und ihre Relevanz für die 2D- und 3D-Punktbestimmung, wobei der Laserscanner in diesem System im 2D-Modus betrieben wird. Aus dieser Übersicht wird deutlich, dass die maßgeblichen Einflussgrößen sowohl konstante als auch entfernungsabhängige Abweichungen hervorrufen können, die für die zweidimensionale Profilmessung nur teilweise zu berücksichtigen sind.

Einflussgröße	**2D**	**3D**	**E**[1]	**K**[2]
Abweichung der Kippachse	x	x	x	
Abweichung der Zielachse	x	x	x	
Abweichung der Stehachse		x	x	
Abweichung des Vertikalindex	x	x	x	
Taumelabweichung		x	x	
Exzentrizität der Achsen		x		x
Einfluss der Gerätetemperatur	x	x	x	
Einfluss von Autokorrelation	x	x	x	x

[1] Entfernungsabhängige Auswirkung, [2] Konstante Auswirkung

Tabelle 7.3: Auswirkung der Einflussgrößen auf die Winkelmessung

Zur Kalibrierung der Winkelencoder existieren eine Reihe von Ansätzen, die sowohl auf die Bestimmung einzelner Achsabweichungen beschränkt sind als auch mehrere Achsen gleichzeitig behandeln. So führen Staiger und Ettel (2003) eine Komponentenkalibrierung der Winkelencoder mit Hilfe mehrerer koordinatenmäßig bekannter Kugeln durch. Schulz und Ingensand (2004a) nutzen hierzu die bekannte Raumtrajektorie einer Interferometerbahn, auf der zwei Referenzkugeln verschoben werden.

Während bei diesen Ansätzen einzelne Abweichungen über einfache mathematische Beziehungen quantifiziert werden, sind auch Verfahren zur gemeinsamen Betrachtung mehrerer Einflüsse verfügbar. Hierbei werden die Auswirkungen unterschiedlicher Achsabweichungen in einem gemeinsamen funktionalen Modell beschrieben und aus redundanten Beobachtungen mit Hilfe von Ausgleichungsverfahren bestimmen. Eine solche Vorgehensweise wird von Rietdorf (2005) vorgeschlagen, der die Abweichungen aller Achsen mit Hilfe von im Raum verteilten Kalibrierebenen bestimmt. Neitzel (2006) verwendet stattdessen die Koordinaten mehrerer in zwei Lagen bestimmter Zielmarken, die über das gesamte vertikale Gesichtsfeld des Scanners verteilt sind. Ziel- und Kippachsabweichung werden in diesem Ansatz aus dem vorliegenden Beobachtungsmaterial durch Ausgleichung im Gauß-Helmert-Modell bestimmt. Diese Ansätze sind geeignet, den Nachteil einer fehlenden Diskretisierbarkeit identischer Punkte durch die Nutzung redundanter Messungen im Rahmen einer Ausgleichung zu kompensieren.

Neben den entfernungsabhängig wirkenden Abweichungen sind auch konstante Parameter wie Achsexzentrizitäten bei der Planung einer Instrumentenkalibrierung grundsätzlich zu berücksichtigen. Die von Ingensand u. a. (2003) bestimmte Exzentrizität der Stehachse eines Imager 5003 konnte mit einem Wert von 0.3 mm mit einer Standardabweichung von 0.1 mm quantifiziert werden. Aufgrund der vergleichsweise geringen Auswirkung wird die Bestimmung der Achsexzentrizitäten nicht vorgenommen.

Im Gegensatz zur Kalibrierung des Moduls „Laserscanner“ kann von einer Kalibrierung des Atmosphärenmoduls aus verschiedenen Gründen abgesehen werden. Zum einen liegen die anzubringenden Korrektionen aufgrund der geringen Messentfernung im Bereich weniger Millimeter, zum anderen ist fraglich, ob die Erfassung der entsprechenden Eingangsgrößen bei bewegten Fahrzeugen mit der notwendigen Genauigkeit erfolgen kann, um signifikante Verbesserung des Messergebnisses herbeizuführen.

Die Kalibrierung des Software-Moduls ist aufgrund der starken Verknüpfung mit dem Modul Laserscanner nicht eigenständig durchführbar. Vielmehr erfolgt eine implizite Kalibrierung der bereits in der Software implementierten Korrekturmodelle im Rahmen der Laserscanner-Kalibrierung, da sich die Effekte dieser beiden Module stark überlagern.

Geometrie/Konfiguration	**Objektoberfläche**
- Spotgröße	- Rauigkeit
- Spotabstand	- Wellenlänge des Lasers
- Abstand vom Scanner	- Farbe der Oberfläche
- Auftreffwinkel	- Helligkeit der Oberfläche
- Räumliche Korrelationen	

Tabelle 7.4: Einflussgrößen auf das Objektmodul

Bei der Kalibrierung der objektspezifischen Komponenten sind generell zwei Arten von Einflussgrößen zu unterscheiden, die zu systematischen und stochastischen Effekten führen. Dies Einflüsse sind zum einen aufgrund der spezifischen geometrischen Eigenschaften des erfassten Objekts und zum anderen durch das Material und die Oberflächenstruktur des Objekts bedingt.

Die Mehrzahl der geometrischen Einflüsse führt im Falle einer Nichtberücksichtigung zur systematischen Abweichungen, wie die umfangreichen Untersuchungen von Kern (2003) belegen. Auch der als „Kometenschweif“ bei Zielmarken in Kugelform bekannte Effekt (Kersten u. a., 2004) ist auf geometrische Beziehungen zwischen dem Laserstrahl und der Neigung der Objektoberfläche zurückzuführen.

Neben den geometrisch bedingten Abweichungen stehen vor allem die durch das Material und die Struktur der Objektoberfläche bedingten Effekte im Vordergrund. Neben der Oberflächenrauigkeit, die im Verhältnis zur Wellenlänge des Lasers betrachtet werden muss, ist auch die mögliche Eindringtiefe in das Material für die Standardabweichung der Entfernungsmessung entscheidend, wie die von Ingensand u. a. (2003) durchgeführten Messungen auf Marmor belegen.

Untersuchungen von Sternberg u. a. (2005) sowie Clark und Robson (2004) zeigen, dass die Farbe und Reflektanz der Objektoberfläche nicht nur zu erhöhten Standardabweichungen der Entfer-

nungsmessung, sondern auch zu einer Nullpunktabweichung der Distanzmessung führen können. Darüber hinaus wird von Gordon u. a. (2001) sowie Kern (2003) mit Hilfe einer Spektralanalyse ein Zusammenhang zwischen der Standardabweichung der Entfernungsmessung auf der einen und der Reflektanz der Objektoberfläche sowie der Wellenlänge des Lasers auf der anderen Seite hergestellt.

Eine Korrektur der durch das Objekt bedingten systematischen und zufälligen Abweichungen ist zwar grundsätzlich möglich, erfordert jedoch dezidierte Kenntnisse des gescannten Objekts. Da das vorliegende System auf die Erfassung ausgedehnter Außenbereiche ausgelegt ist, kann eine solche Ermittlung der Objekteigenschaften nur mit sehr hohem Aufwand realisiert werden.

Da der Laserscanner das zentrale Modul des Systems bildet und darüber hinaus auch die Mehrzahl der zu kalibrierenden Größen beinhaltet, wird der Schwerpunkt der Kalibrierarbeiten im Modul Laserscanner liegen. Innerhalb dieses Moduls sind vor allem die Auswirkungen der Gerätetemperatur, die Abweichungen von Ziel- und Kippachse sowie die des Vertikalindexes zu kalibrieren, da diese entfernungsabhängig wirken und somit die Genauigkeit der Punktbestimmung signifikant beeinflussen. Weitere Effekte besitzen bezogen auf den Scanner entweder keine Relevanz bei zweidimensionalen Profilmessungen oder liegen durch bereits berücksichtigte geräteinterne Korrektionen in einer Größenordnung, die für die Genauigkeit des vorliegenden Systems unbedenklich ist. Dies gilt auch für die von Cheok u. a. (2002) beschriebenen zeitlichen und räumlichen Autokorrelationseffekte, die sich aufgrund der hohen Abtastrate und den geringen Punktabständen ergeben können. Diejenigen Größen, bei denen sich der Einfluss systematischer Effekte aufgrund von Erfahrungswerten mit ausreichender Genauigkeit als unbedeutend abschätzen lässt, werden nicht kalibriert.

7.3 Kalibrierung des Laserscanners

7.3.1 Indexabweichung des Vertikalencoders

Die scannerinternen Rohdaten einer Profilmessung bestehen äquivalent zu Messungen mit Tachymetern aus einem Vertikalwinkel und einer Raumstrecke. Durch mechanische Abweichungen ist der Nullpunkt des Vertikalencoders nie exakt auf die idealisierte Referenzrichtung (Nadir oder Zenit) bezogen, sondern besitzt in der Regel einen gerätespezifischen Offset, der einer von Theodoliten bekannten Indexabweichung entspricht.

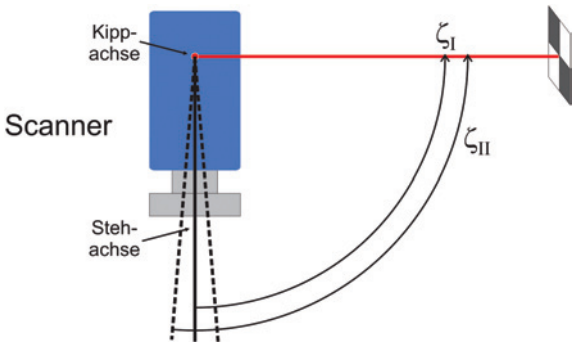


Abbildung 7.9: Bestimmung des Vertikaloffsets in zwei Lagen

Dieser Offset ist in den vom Hersteller ermittelten und im Scanner abgelegten Kalibrierwerten enthalten und wird bei Messungen bereits im Gerät berücksichtigt, was jedoch nur für Messungen im 3D-Modus gilt. Bei zweidimensionalen Profilmessungen wird ein eventuell vorhandener Offset bei der Ausgabe der kartesischen Koordinaten nicht berücksichtigt und ist insofern kalibriertechnisch zu bestimmen. Dies kann mit Hilfe einer in zwei Lagen durchgeführten Messung zu einem oder mehreren diskretisierten Punkten geschehen (Abbildung 7.9). Bei Profilmessungen kann der vertikale Schwarz-Weiß-Übergang zwischen den Feldern einer Z+F-Zielmarke (Abbildung 7.10) als Diskretisierungselement verwendet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Indexabweichung des Vertikalencoders mit einem Wert von

$$\zeta_0 = \frac{\zeta_I + \zeta_{II} - 400}{2} = 0.02 \text{ mgon} \tag{7.3}$$

bestimmt. Dieser kann ebenso wie die Berücksichtigung der Achsfehler vor der Transformation der Objektpunkte vom Scanner- in das Fahrzeugkoordinatensystem berücksichtigt werden.

7.3.2 Achsabweichungen

Die bereits von Theodoliten bekannten systematisch auf die Winkelmessung wirkenden Effekte der Ziel- und Kippachsabweichung treten bedingt durch die Ähnlichkeit des Messverfahrens auch bei 3D-Laserscannern auf. Da der Einfluss auf die Punktbestimmung, den nicht korrigierte Achsabweichungen besitzen, mit zunehmender Entfernung linear ansteigt, sind Ziel- und Kippachsabweichungen des verwendeten Scanners zu bestimmen.

Hierzu wurde ein Verfahren verwendet, welches von Neitzel (2006) exemplarisch mit einem Laserscanner durchgeführt wurde, der baugleich mit dem in dieser Arbeit verwendeten Sensor war. Hierbei kann eine Kalibrierung der Achsfehler mit beliebigen Zielmarken oder Kugeln durchgeführt werden.

Zu diesem Zweck wurden im Labor insgesamt 24 Standardzielmarken von Zoller+Fröhlich über einen 107 gon großen Ausschnitt des vertikalen Gesichtsfeldes verteilt und mit dem Imager 5003 in zwei Lagen erfasst. Abbildung 7.10 zeigt den realisierten Messaufbau in der Übersicht. Im Anschluss wurden die Ziel- und Kippachsabweichung mit Hilfe einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten ermittelt und den von Neitzel (2006) ermittelten Werten gegenübergestellt.

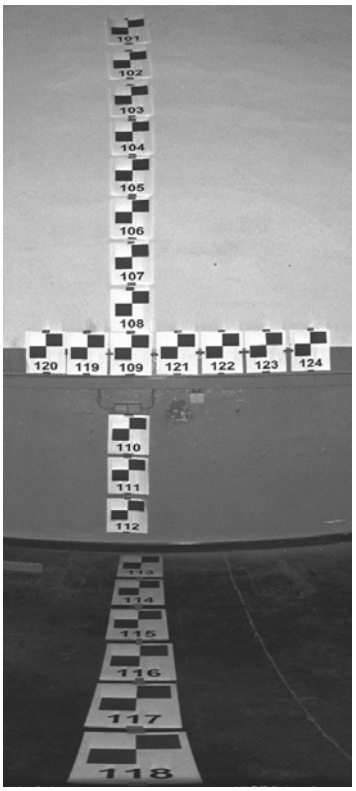


Abbildung 7.10: Zielmarken

Tabelle 7.5 zeigt, dass die Größenordnung der von Neitzel (2006) beobachteten Zielachsabweichung bestätigt werden kann, auch wenn sie ein umgekehrtes Vorzeichen besitzt. Aufgrund der Größe der festgestellten Abweichungen erscheint es notwendig, diese im Rahmen der Auswertung noch vor der Transformation der Objektpunkte vom Scanner- in das Fahrzeugkoordinatensystem zu berücksichtigen. Ausgehend von der großen Differenz der Abweichungen zu den in Tabelle 7.5 genannten Vergleichswerten ist die Frage nach einer Zeitvarianz dieser Größen zu stellen, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit unbeantwortet bleiben muss.

Neben den genannten Achsabweichungen ist prinzipiell auch die von Schulz und Ingensand (2004b) beschriebene Taumelabweichung bei Laserscannern vorhanden. Dieser spielt jedoch ebenso wie die Stehachsabweichung bei Messungen im Profilmodus keine Rolle, so dass eine Bestimmung an dieser Stelle unterbleibt.

Parameter	**Zielachsfehler** c	**Kippachsfehler** i
Eigene Kalibrierung		
Achsfehler	35.6 mgon	-0.7 mgon
Standardunsicherheit	3.4 mgon	0.9 mgon
Neitzel (2006)		
Achsfehler	-35.4 mgon	-14.6 mgon
Standardunsicherheit	3.6 mgon	3.2 mgon

Tabelle 7.5: Kalibrierwerte des Inklinometers

7.3.3 Temperaturabhängigkeit

Die Bestimmung systematischer Restabweichungen aufgrund eines nicht kompensierten Temperatureinflusses auf die Ergebnisgröße ist bei der geodätischen Kalibrierung von Sensoren obligatorisch. Insbesondere beim vorliegenden System ist eine solche Prüfung unumgänglich, da für eine Erfassung ausgedehnter Objekte vergleichsweise lange Scanzeiten ohne Beeinträchtigung der Messergebnisse gewährleistet werden müssen. Wie bereits in den Abbildungen 7.7 und 7.8 gezeigt, wird die Sensortemperatur jedoch nicht bei allen am Markt verfügbaren Scannermodellen ausreichend berücksichtigt.

Als einer der wenigen Scanner bietet der Imager 5003 die Möglichkeit, verschiedene interne Temperatursensoren über Bibliotheksfunktionen des Gerätetreibers abzufragen. Da der Scanner im Client-Server-Betrieb angesteuert wird, kann dies auch zu beliebigen Zeitpunkten während der Messung geschehen. Ein beispielhaftes Ergebnis der internen Temperaturmessung kann Abbildung 7.11 entnommen werden.

```
[T1] 26.6 C  Internal air Temperature
[T2] 33.7 C  ok (min:12.60 max:49.80) Laser Head Temperature
[T3] 30.0 C  ok (min:27.60 max:32.40) TEC Temperature
[T4] 36.1 C  ok (min:8.80 max:54.50)  AS Board Temperature
[T5] 43.8 C  ok (min:12.70 max:59.20) RF Box Temperature
[T6] 41.7 C  ok (min:10.80 max:57.10) Receiver Temperature
[T7] 43.1 C  ok (min:11.90 max:58.40) Transmitter
```

Abbildung 7.11: Abfrage der internen Temperatursensoren

Zur Abschätzung des Einflusses, den eine nicht kompensierte Änderung der Geräteinnentemperatur auf die Messwerte besitzt, wurde mit dem verwendeten Scanner eine feststehende Kugel durch insgesamt 240 aufeinanderfolgende Aufnahmen im Abstand von 30 Sekunden gescannt. Hierdurch kann bei höchster Auflösung eine annähernd dauerhafte Belastung des Sensors simuliert werden.

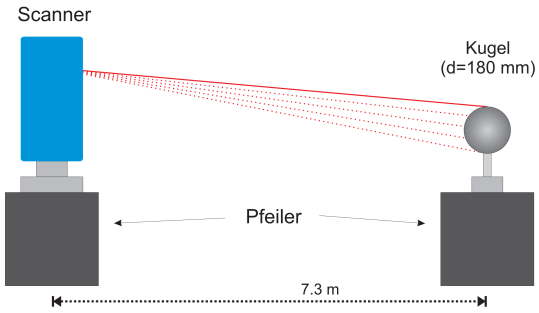


Abbildung 7.12: Messkonfiguration Dauerscan

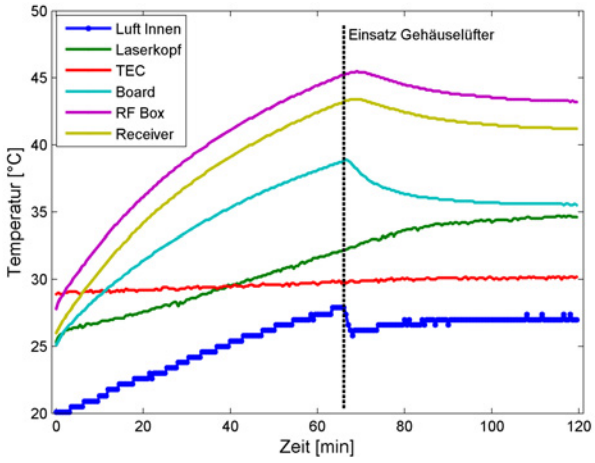


Abbildung 7.13: Temperaturverlauf Scanner

Abbildung 7.13 zeigt den Verlauf der äquidistant aufgezeichneten Temperaturmessungen über den Zeitraum der Dauerscans von 120 Minuten. Hierin ist auch der Zeitpunkt gut zu erkennen, an dem die in den Scanner integrierten Lüfter aktiviert werden, um die Innentemperatur des Scanners zu reduzieren. Zudem ist zu erkennen, dass das Einschalten der Lüfter keinen oder nur unwesentlichen Einfluss auf die Erwärmung des Laserkopfes besitzt, dessen Temperatur sich einem Grenzwert von 35° C annähert.

Obwohl die erfassten Streckenmesswerte einen leichten Trend erkennen lassen, bewegt sich die Entfernungsänderung zur Referenzkugel im Submillimeterbereich und kann somit vernachlässigt werden. Die Änderung des gemessenen Horizontalwinkels folgt näherungsweise dem in Abbildung 7.13 dargestellten nichtlinearen Verlauf der Gerätetemperatur. Die Amplitude der Winkeländerung innerhalb des Messzeitraumes liegt bei etwa 10 mgon, was einem tangentialen Effekt von 3 mm bezogen auf die festgelegte Messentfernung von 20 m entspricht.

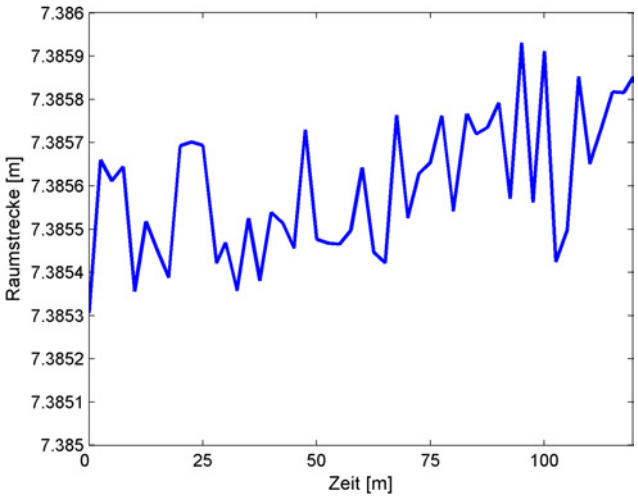


Abbildung 7.14: Variation der Raumstrecke

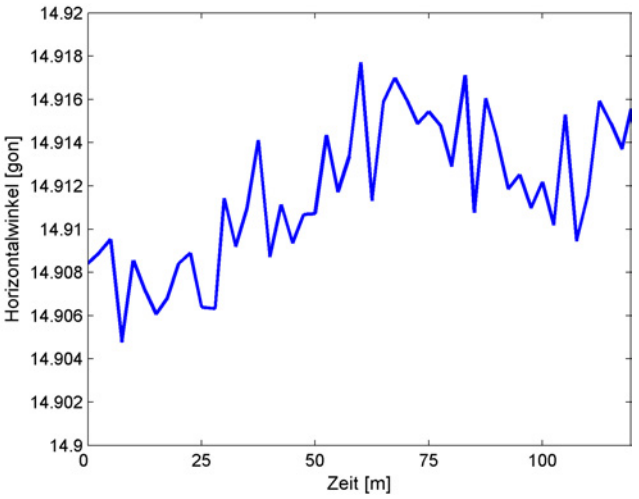


Abbildung 7.15: Variation des Horizontalwinkels

Die in Tabelle 7.6 dargestellte symmetrische Korrelationsmatrix zeigt, dass kein Temperatursensor eindeutig identifiziert werden kann, der besonders für eine Charakterisierung der systematischen Abweichung des Horizontalwinkels geeignet ist.

Aus den durchgeführten Untersuchungen wird klar, dass die Sensortemperatur bei vorliegendem Scannermodell nur sehr geringen Einfluss auf die Bestimmung von Winkel- und Distanzmessung besitzt. Die beobachtete Variation des Horizontalwinkels liegt bei der für dieses System relevanten Messentfernung im Rahmen weniger Millimeter, so dass eine Berücksichtigung des Temperatureinflusses für das vorliegende System nicht notwendig ist.

	Hz	$\mathbf{T_1}$	$\mathbf{T_2}$	$\mathbf{T_3}$	$\mathbf{T_4}$	$\mathbf{T_5}$	$\mathbf{T_6}$
Hz (Hz-Winkel)	1	0.72	0.71	0.68	0.70	0.73	0.73
$\mathbf{T_1}$ (Interal Air)		1	0.90	0.90	0.94	0.98	0.98
$\mathbf{T_2}$ (Laser Head)			1	0.99	0.76	0.87	0.86
$\mathbf{T_3}$ (TEC)				1	0.77	0.87	0.87
$\mathbf{T_4}$ (AS Board)					1	0.98	0.98
$\mathbf{T_5}$ (RF Box)						1	0.99
$\mathbf{T_6}$ (Receiver)							1

Tabelle 7.6: Korrelationsmatrix zwischen Temperaturwerten und Horizontalwinkel

7.4 Kalibrierung des Inklinometers

7.4.1 Nullpunkt und Maßstab

Für die in diesem System verwendete AccuStar-Libelle wurden bereits durch die Herstellerfirma Schaevitz die in Tabelle 7.7 aufgeführten Kalibrierwerte bestimmt. Für den Einsatz im vorliegenden System war das Inklinometer mit Hilfe einer speziellen Adaptierung zu befestigen, so dass eine Neubestimmung des Nullpunktversatzes im Labor durchgeführt werden musste. In diesem Zusammenhang wurden auch der Maßstab der Neigungsmessung sowie die Temperaturabhängigkeit (Kapitel 7.4.2) des Sensors einer erneuten Überprüfung unterzogen.

Für die praktische Ermittlung der Parameter Nullpunkt und Maßstab wurde die Libelle auf der Adaptierungsplatte des Distanzmessers eines Wild T3000 befestigt, wodurch eine sichere Fixierung des Sensors gewährleistet werden konnte. Das Objektiv wurde mit Hilfe des Feintriebes über einen Zenitwinkelbereich von 80 gon $\leq z <$ 120 gon in Schritten zu je 0.5 gon gekippt, was einer Neigung des Inklinometers von -20 gon $\leq \alpha < +20$ gon entspricht. Zusätzlich wurde die Raumtemperatur in der Nähe des Inklinometers erfasst. Der analoge Spannungswert (Volt) des Sensors wurde über das Analog-Digital-Modul des Echtzeitrechners erfasst und als Mittel- sowie Medianwert aus jeweils zehn Einzelmessungen bestimmt.

Parameter	Wert	Einheit	Erläuterung
Übertragungsfunktion			
Maßstabsfaktor	19.718	gon/mVolt	
Linearitätsabweichung	0.55	%	
Nullpunkt	-	mVolt	Abhängig von Adaptierung
Temperatur			
$TK_{Nullpunkt}$	0.0029	gon/°C	TK=Temperatur-
$TK_{Maßstab}$	-0.017	%/°C	koeffizient
Wiederholgenauigkeit			
Nullpunkt	Pass		Prüfung bestanden

Tabelle 7.7: Kalibrierwerte des Inklinometers ab Werk

Wie aus Kapitel 6.2.2 entnommen werden kann, besitzt das Inklinometer eine lineare Kennlinie im Bereich von $+45°$ bis $-45°$. Der Zusammenhang zwischen Neigung des Inklinometers und seinem Signalausgang ist in Abbildung 7.16 zusehen.

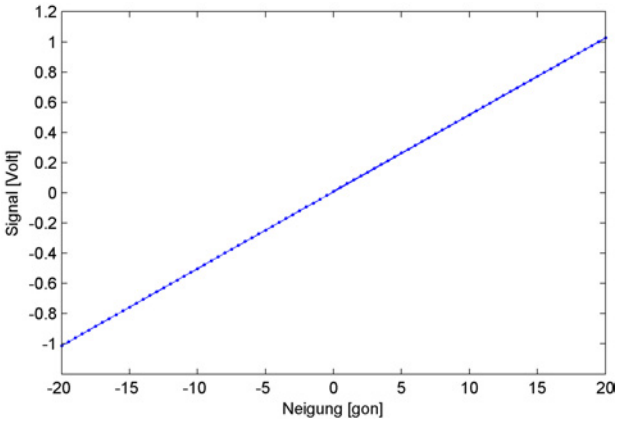


Abbildung 7.16: Kalibrierkurve des Inklinometers

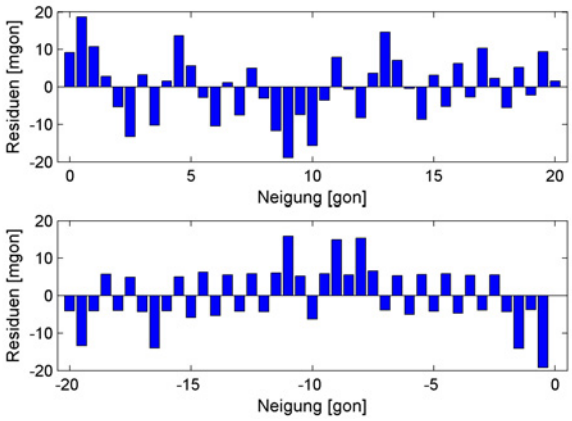


Abbildung 7.17: Residuen der Regression

Die gesuchten Parameter wurden nun durch lineare Regression ermittelt (Tabelle 7.8). Eine genauere Betrachtung der Residuen ergab, dass die Parameter der linearen Kalibrierfunktion abhängig von der Neigungsrichtung sind, so dass zwei getrennte Kalibrierfunktionen bestimmt wurden. Da die Temperatur während der Kalibrierung um lediglich 0.36 ° C variierte, liegt die Vermutung nahe, dass die beiden Kammern des Inklinometers (Abbildung 6.12) divergierende Kennlinien besitzen oder nicht symmetrisch zur Neigungsachse gelagert sind.

Parameter	Wert	Standardunsicherheit
Bereich 0 gon $\leq \alpha <$ 20 gon		
Bestimmtheitsmaß B	0.999999994	
Maßstab m	19.6797 gon/Volt	4.52 mgon/Volt
Nullpunkt	-0.2093 gon	2.71 mgon
Bereich -20 gon $\leq \alpha <$ 0 gon		
Bestimmtheitsmaß B	0.999999992	
Maßstab m	19.6075 gon/Volt	4.37 mgon/Volt
Nullpunkt	-0.1809 gon	2.59 mgon

Tabelle 7.8: Vergleich der Latenzzeiten bei unterschiedlicher Systemlast

Im Vorgriff auf die Abbildungen 7.18 und 7.19 ist anzumerken, dass das analoge Ausgangssignal des Inklinometers nicht nur mit einem vergleichsweise hohen Rauschniveau, sondern auch mit Ausreißern behaftet ist. Aus diesem Grund wurden die ermittelten Medianwerte anstelle der Mittelwerte als Eingangsgrößen der Regression verwendet, was sich in deutlich besseren Bestimmtheitsmaßen sowie niedrigeren Standardabweichungen der Regressionsparameter bemerkbar machte.

7.4.2 Temperatureinfluss und Signalrauschen

Eine Variation der Sensortemperatur führt häufig zu systematischen Effekten bei flüssigkeitsbasierten Neigungsmessern (Abbildung 6.10). Aus diesem Grund wurde die Temperaturabhängigkeit des verwendeten Schaevitz AccuStar Inklinometers innerhalb eines klimatisierbaren Behälters untersucht. Die Messungen wurden jeweils für eine Neigung von annähernd 0 gon sowie -30 gon durchgeführt. Aufgrund des begrenzten Raumes innerhalb des Behälters konnte keine absolute Referenz für den Neigungswert ermittelt werden, so dass diese als Näherungswerte zu verstehen sind.

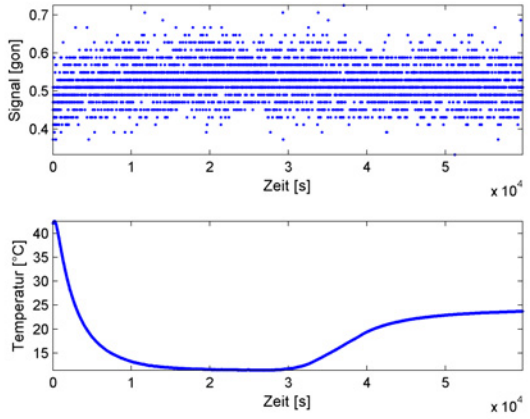


Abbildung 7.18: Signal- und Temperaturkurven bei 0° Neigung

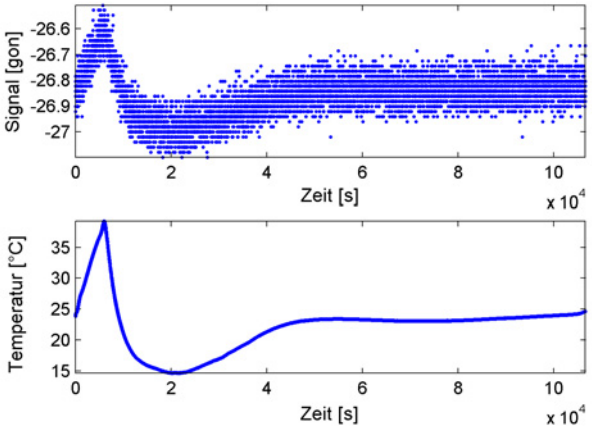


Abbildung 7.19: Signal- und Temperaturkurven bei -30° Neigung

Die Abbildungen 7.18 und 7.19 zeigen den zeitlichen Verlauf des Ausgangssignals unter wechselnder Sensortemperatur. Durch lineare Regression lässt sich für die Messung mit dem um −30 gon geneigten Inklinometer auch hier der Zusammenhang modellieren. So führt eine Temperaturänderung von 1° C bei einer Neigung von −30 gon zu einer systematischen Abweichung des Ausgangssignals von 16 mgon. Für die Nullstellung des Neigungsmessers war hingegen kein signifikanter Zusammenhang mit einer Temperaturänderung nachweisbar.

Parameter	**Neigung 0 gon**	**Neigung -30 gon**
Bestimmtheitsmaß B	0.993	0.999997
Maßstab m	-1.8 mgon/°C	15.8 mgon/°C
Standardabweichung σ_m	0.05 mgon/°C	0.11 mgon/°C

Tabelle 7.9: Regressionsparameter bei 0 gon und -30 gon Neigung

Bei der Bewertung der Regressionsergebnisse ist zu beachten, dass aufgrund der ermittelten Bestimmtheitsmaße kein präziser Zusammenhang zwischen Sensortemperatur und systematischer Messabweichung abgeleitet werden kann. Dennoch wird klar, dass der Einfluss der Sensortemperatur bei geringen Neigungen des Inklinometers vergleichsweise unbedeutend ist. Da das vorliegende System jedoch auf den Einsatz auf Straßen ausgelegt ist, sind Querneigungen von mehr als 10 gon nur in Ausnahmefällen zu erwarten, so dass eine Temperaturkorrektion auf ebenen Strecken nicht zwigend notwendig ist.

Nach Abzug des Temperatureinflusses sind keine weiteren systematischen Effekte mehr zu erkennen. Das verbleibende Signalrauschen besitzt eine Standardabweichung von umgerechnet 45.3 mgon, was im Kontext der geforderten Objektpunktgenauigkeiten als relativ hoch einzuschätzen ist. Da die verwendete Libelle einen Dynamikbereich von 3 Hz (schnellstmögliche Reaktion auf differentielle Neigungsänderung) besitzt, sollte die am Echtzeitrechner gewählte Wandlungsrate des analogen Signals um den Faktor 10 höher gewählt werden, um eine Medianfilterung vornehmen zu können. Unter Vernachlässigung von Autokorrelationseffekten kann das Signalrauschen durch diese Maßnahme um den Faktor 3 verringert werden.

7.5 Fahrzeug- und Sensorkoordinatensysteme

7.5.1 Einrichtung des Fahrzeugkoordinatensystems

Das Fahrzeugkoordinatensystem ist, wie in Kapitel 3.1.4 erläutert, durch die Achsen des Fahrzeuges definiert. Der Ursprung des Fahrzeugsystems

$$\boldsymbol{X}_{Kfz,0} = \begin{bmatrix} X_{Kfz} \\ Y_{Kfz} \\ Z_{Kfz} \end{bmatrix}_0 \tag{7.4}$$

liegt hierbei im Schnittpunkt der Hinterachse mit einer das Fahrzeug in Längsrichtung teilenden Ebene, die durch den Drehpunkt der Vorderachse verläuft. Die X-Achse liegt in Fahrtrichtung, die Y-Achse koaxial zur Hinterachse und die nach oben zeigende Z-Achse vervollständigt das rechtshändige Koordinatensystem. Abbildung 7.20 zeigt das Fahrzeug und sein Koordinatensystem sowie die verwendeten Sensoren in der Draufsicht.

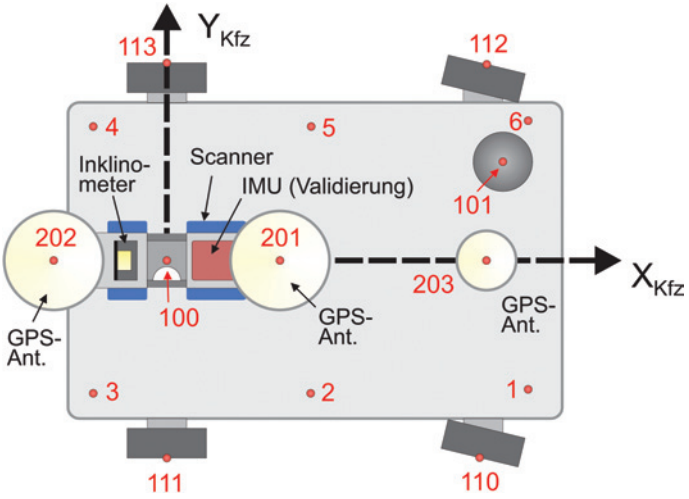


Abbildung 7.20: Fahrzeugkoordinatensystem

Zur Bestimmung der Sensorpositionen, hierbei insbesondere der von Laserscanner und GPS-Antennen, wurden alle Punkte mit Hilfe eines Theodolit-Messsystems (TMS) vom Typ Leica TPS5000 eingemessen. Da der Drehpunkt der Vorderachse ausschließlich von der Unterseite des Fahrzeuges zugänglich ist, wurde eine Verknüpfung der verschiedenen Standpunkte des TMS über das vorhandene Laborkoordinatensystem sowie eine Reihe von identischen Punkten am Fahrzeug vorgenommen.

Punktnummer	**Bezeichnung**
1-7	Hilfspunkte zur Transformation
100	Schnittpunkt Stehachse/Dreifuß des Scanners
101	Mittelpunkt Referenzkugel
110, 112, 111, 113	Achsmittelpunkte von Vorder- und Hinterachse
201, 202	GPS Antenne vorne, hinten

Tabelle 7.10: Punktnummern und ihre Bezeichnungen im Kfz-System

Um eine Transformation der durch die GPS-Antennen ermittelten Raumpositionen vom WGS84-System in das Scanner-Koordinatensystem vornehmen zu können, mussten zudem Ursprung und Ausrichtung des Scannerkoordinatensystems im Verhältnis zum Fahrzeugsystem bestimmt werden. Hierzu wurden insgesamt sieben Zielmarken auf der Grundplatte des Fahrzeuges befestigt und sowohl mit dem Scanner als auch mit dem TMS koordinatenmäßig ermittelt. Der Scan dieser Zielmarken ist nach jeder neuen Adaptierung des Scanners auf dem Messwagen zu wiederholen.

Die Koordinaten der Fahrzeugachsen und Sensorpositionen sowie ihre Standardunsicherheiten im Fahrzeugkoordinatensystem sind in Tabelle 7.11 aufgelistet.

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Sx [mm]	Sy [mm]	Sz [mm]
Fahrzeugachsen						
110	957.69	-425.23	0.22	0.05	0.05	0.05
111	0.00	-431.68	0.00	0.09	0.10	0.12
112	1086.73	425.23	-0.22	0.02	0.02	0.02
113	-0.000	429.34	0.00	0.02	0.02	0.02
Scanner						
1000	-30.91	-9.72	761.28			
Kugel						
101	1143.69	317.72	408.58	0.12^{+}	0.12^{+}	0.11^{+}
GPS						
201	269.92	-14.58	942.95	0.15*	0.18*	0.11*
202	-335.48	-22.84	933.29	0.13*	0.18*	0.12*
203	1004.93	4.53	698.80	0.10*	0.10*	0.10*

$^{+}$ Kugelzentrum indirekt bestimmt mit $\sigma_{Radius} = 0.1\ mm$

* Bezogen auf geometrisches Zentrum mit $\sigma^2_{XYZ,Punkt} = \sigma^2_{XYZ,Messung} + \sigma^2_{XYZ,Zentrierung}$

Tabelle 7.11: Koordinaten der Fahrzeugachsen und Sensoren

Die in Tabelle 7.11 genannten Genauigkeiten Sx, Sx und Sz entsprechen den von der Software Leica-AXYZ angegebenen gemittelten Standardabweichungen aus einer Messung in zwei Lagen. Da das optische Zentrum des Scanners (Punkt 1000) durch Transformation über identische Punkte bestimmt wurde und keine Genauigkeiten für die erfassten Scanpixel verfügbar sind, wird auf die Angabe einer Standardabweichung verzichtet.

Im Hinblick auf die Standardabweichung der Positionen der GPS-Antennen sowie der Referenzkugel ist zu beachten, dass diese aufgrund der fehlenden Diskretisierbarkeit nur indirekt bestimmt werden konnten. Somit sind bei der Angabe der Standardabweichungen die Genauigkeiten des Kugelradius σ_{Radius} und der Zentrierung auf den Antennenmittelpunkt $\sigma^2_{XYZ,Zentrierung}$ additiv zu berücksichtigen.

Auf eine Bestimmung von Ursprung und Achsen des Koordinatensystems des Inklinometers sowie der zur Systemprüfung verwendeten Inertialmesseinheit (Kapitel 9.4.1) wurde an dieser Stelle verzichtet, da diese Sensoren ausschließlich relative Messwerte (Neigungen) liefern. In diesem Fall erfolgte lediglich eine sorgfältige Ausrichtung der Sensorachsen zueinander.

7.5.2 In-situ-Orientierung des Scanners

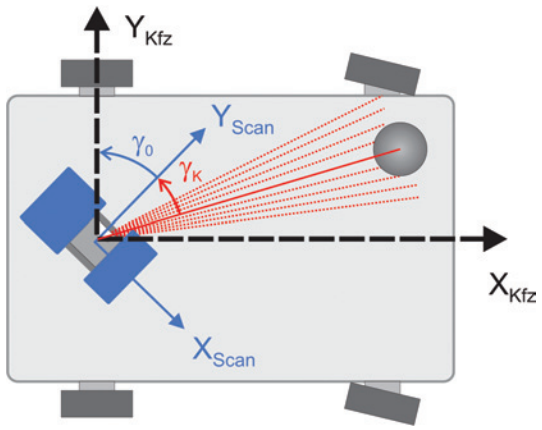


Abbildung 7.21: Automatische Ausrichtung des Scanners

Grundsätzlich kann die Objekterfassung mit einem beliebig orientierten Profilscanner durchgeführt werden, solange die Parameter seiner räumlichen Orientierung bekannt sind. Für eine optimale Erfassung der auf beiden Seiten befindlichen Objekte mit minimalen Abschattungen ist jedoch eine Ausrichtung der Scanprofile quer zur Längsachse des Fahrzeuges wünschenswert. Aus diesem Grund wurde der nach Adaptierung auf dem Fahrzeug willkürlich um den Winkel γ_0 zur Y-Achse verdrehte Scanner vor jeder Messung quer zur Fahrtrichtung gedreht (Abbildung 7.21).

Um eine möglichst präzise Ausrichtung zu gewährleisten wird hierzu vor jeder Messung eine Kugel im vorderen Teil des Fahrzeuges erfasst, deren Mittelpunktkoordinaten im Fahrzeugsystem bekannt sind. Somit kann auch der Winkel $\gamma_0 + \gamma_K$ zwischen der Mittelpunktgeraden zur Kugel und der Y-Achse des Fahrzeugsystems berechnet und zur Drehung des Scanners genutzt werden.

7.6 Prüfung und Kalibrierung des Echtzeitrechners

7.6.1 Drift der Uhr

Die Bestimmung der Erfassungszeitpunkte für die digitalen Signale von GPS-Empfänger und Scanner erfolgt grundsätzlich über die interne Uhr des Echtzeitrechners. Da eine Verknüpfung von Scandaten und GPS-Positionen ausschließlich über eine zeitliche Referenzierung vollzogen wird, ist die Genauigkeit einer solchen Referenzierung als wesentlicher Parameter dieses Systems zu sehen.

Obwohl auftretende Driften durch die kontinuierliche Aufzeichnung des hochgenauen PPS-Pulses in der nachfolgenden Auswertung korrigiert werden können, sollte die interne Uhr des Messrechners dennoch einer Kalibrierung unterzogen werden. Nur dann können bei eventuellen Signalausfällen von GPS vorhandene Datenlücken ohne systematische Effekte allein durch die Uhr des Echtzeitrechners überbrückt werden.

Aus diesem Grund wurden die durch den PPS-Puls ausgelösten Interrupts und deren Zeitpunkte im Zeitsystem des Echtzeitrechners über eine Dauer von 360 Sekunden beobachtet. Für das PPS-Signal kann ein äquidistanter Epochenabstand von 1 s mit einer Standardunsicherheit von besser als 1 μs angenommen werden. Die Drift der Uhr des Messrechners wird zunächst auf bekanntem Wege mit Hilfe einer linearen Regression bestimmt. Als Ergebnis der Regression konnte ein Maßstabsfaktor m der Echtzeituhr von

$$m = 0.99993 \ \frac{\mathrm{s}}{\mathrm{s}}, \text{ mit} \quad \sigma_m = 0.25 \ \frac{\mathrm{ms}}{\mathrm{s}} \tag{7.5}$$

festgestellt werden, was einem Wert von 3.86 ms/min entspricht.

Die in Abbildung 7.22 dargestellten Residuen eines linearen Regressionsansatzes zeigen, dass der Zusammenhang zwischen GPS-Zeitnormal und der Zeit des Sorcus-Rechners mit Hilfe einer Funktion höherer Ordnung beschrieben werden sollte. Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass das Frequenznormal des Echtzeitrechners eine signifikante Abhängigkeit von der Innentemperatur des Systems besitzt.

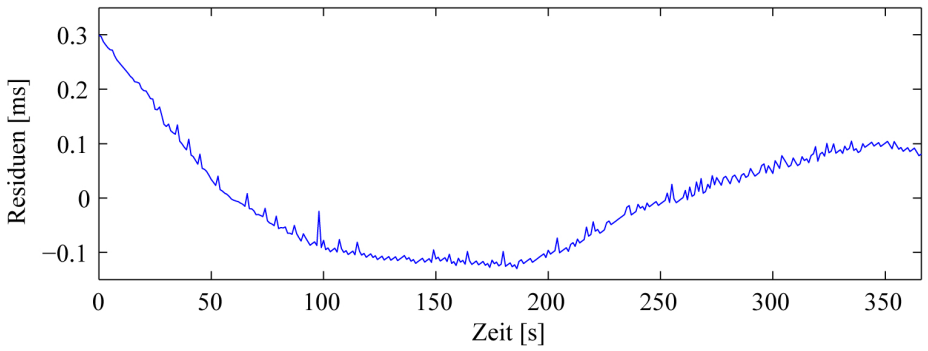


Abbildung 7.22: Drift der internen Uhr des Echtzeitrechners

Nach etwa 350 Sekunden kann die temperaturbedingte Drift hingegen durch eine lineare Funktion dargestellt werden, so dass auch längere Zeiträume ohne GPS-Empfang überbrückt werden können. Da die Innentemperatur des Echtzeitrechners nur mit hohem Aufwand bestimmt werden kann sollte sich diese Peripherieeinheit vor einem Einsatz mindestens 6 Minuten in Betrieb befinden.

7.6.2 Latenzzeiten

Ungeachtet der Tatsache, dass der verwendete Messrechner ein Echtzeitbetriebssystem zur Datenerfassung nutzt, können auch hier unerwünschte Verzögerungen bei der Bestimmung der Signalzeitpunkte auftreten. Diese wiegen insbesondere bei der Erfassung der digitalen Rechtecksignale schwer, so dass eine Überprüfung der maximal auftretenden Latenzen notwendig ist.

Tabelle 7.12 zeigt die beiden Konfigurationen, in denen die Latenzzeiten des Systems ermittelt wurden. Für die Simulation einer hohen Systemlast sollte zum einen die datenintensive Erfassung von analogen

Parameter	Hohe Systemlast	Geringe Systemlast
SRQ Status	Ein	Aus
Puffer Digital IO	50 Byte	50.000 Byte
Puffer AD-Wandlung	500 Byte	5.000 Byte
Abtastrate Scanner	33 Hz	12.4 Hz
Abtastrate AccuStar	100 Hz	2 Hz

Tabelle 7.12: Vergleich der Latenzzeiten bei unterschiedlicher Systemlast

Signalen des Neigungsmessers und zum anderen eine Bestimmung der Interruptzeitpunkte des Scannersignals erfolgen. Neben den Kontextwechseln des Betriebssystems, die für eine Umschaltung der verschiedenen Moduleingänge notwendig ist, wird die Systemlast stark von der Kommunikation mit dem Host-PC beeinflusst. So können häufige an den Host gesendete Service-Requests (SRQ) ebenso wie eine große Anzahl an Speicherzugriffen durch die dafür notwendigen Bibliotheksaufrufe die Systemleistung signifikant vermindern.

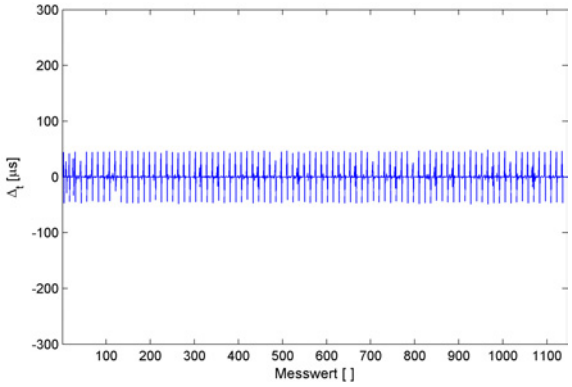


Abbildung 7.23: Verzögerung bei 0.6 kByte Puffergröße

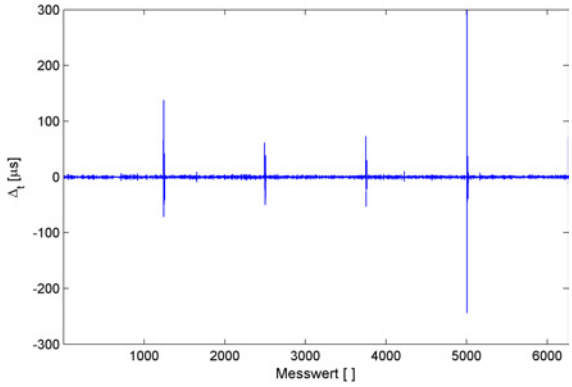


Abbildung 7.24: Verzögerung bei 60 kByte Puffergröße

Wie sehr eine umfangreiche Datenübertragung vom Echtzeitrechner zum Host die Antwortzeiten des Systems beeinflussen kann, zeigen die Abbildungen 7.23 und 7.24. Hierbei wird eine mit einer Frequenz von 10 kHz durchgeführte AD-Wandlung durch die Übermittlung eines SRQ an den Host-Rechner sowie die anschließende Übertragung der gepufferten Daten gestört. Bei einer Puffergröße von 0.6 kByte (Abbildung 7.23) muss die Übertragung der Daten sehr häufig, aber mit kurzer Dauer, bei 60 kByte (Abbildung 7.24) hingegen seltener, aber mit längerer Übertragungszeit durchgeführt werden. Werden während einer solchen Datenübertragung Interrupts oder Timer ausgelöst, können die entsprechenden Tasks nicht aktiviert werden, so dass harte Echtzeitanforderungen unter Umständen verletzt werden.

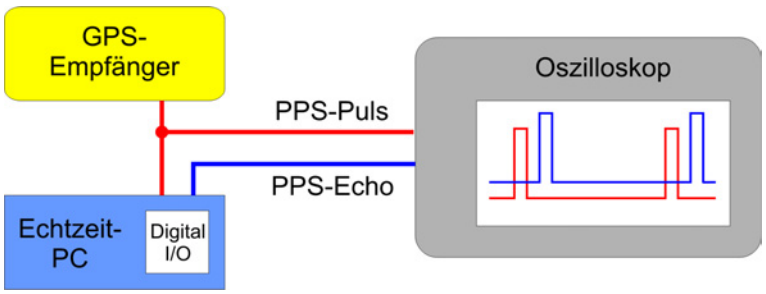


Abbildung 7.25: Messanordnung zur Bestimmung der Latenzzeit

Aus diesem Grund ist die Verwendung großer Übertragungsvolumina aus dem Ringpuffer des Echtzeitrechners bei hohen Anforderungen an die Determiniertheit des Systems zu vermeiden. Da Interrupts mit höchster Priorität auch andere Tasktypen unterbrechen können, soll im Folgenden die genaue Latenzzeit eines mit höchster Priorität versehenen Interrupteingangs quantifiziert werden.

Hierzu wurde das PPS-Signal des GPS-Empfängers verwendet, indem es gleichzeitig auf einen der Eingänge des Sorcus Digitalmoduls und den eines Oszilloskops geschaltet wurde. Über einen Ausgang des

Digitalmoduls wurde der erfasste PPS-Puls direkt nach seiner Registrierung durch die Sorcus-Hardware in Form eine Echos auf den zweiten Eingang des Oszilloskops weitergeleitet (Abbildung 7.25). Anhand der Überlagerung des ursprünglichen Signals mit seinem „Echo“ aus dem Echtzeitrechner konnte die Latenzzeit in beiden Konfigurationen bestimmt werden.

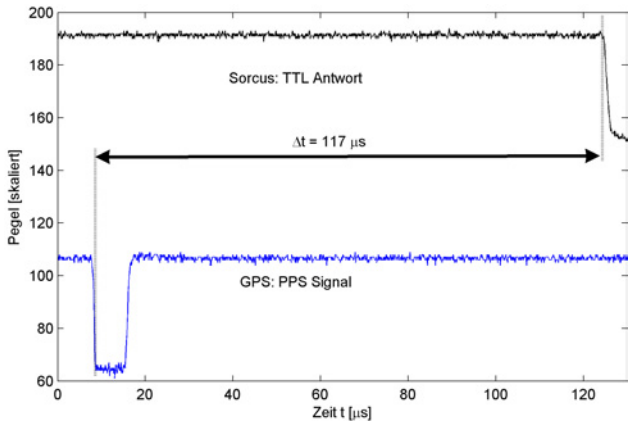


Abbildung 7.26: Latenzzeit bei hoher Systemlast

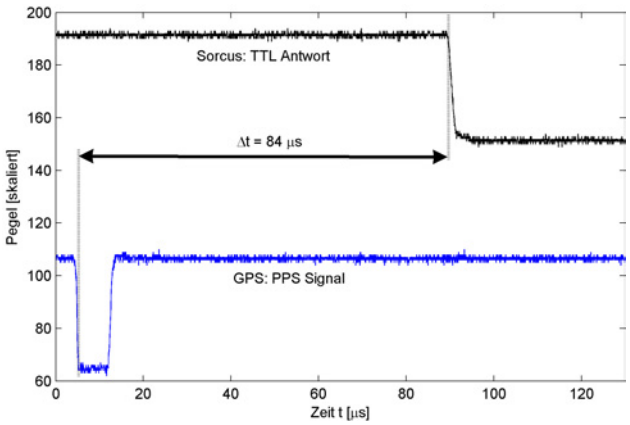


Abbildung 7.27: Latenzzeit bei niedriger Systemlast

Die in den Abbildungen 7.26 und 7.27 dargestellten Differenzen zwischen Signal und Echo entsprechen in etwa der doppelten Latenzzeit des Echtzeitrechners, da dieser sowohl für die Erfassung als auch für die erneute Ausgabe des Signals eine Task aktivieren und somit einen Kontextwechsel vornehmen muss. Die Latenzzeit $\Delta_{l(t)}$ ergibt sich somit aus

$$2 \cdot \Delta_L \sim t_{Echo} - t_{Signal}. \tag{7.6}$$

Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine maximale Latenzzeit ermittelt, die bei sehr hoher Systemlast im Bereich von $\Delta_L = 59$ μs lag (Abbildung 7.26). Bei niedriger Auslastung betrug die festgestellte Latenzzeit hingegen nur 42 μs. Obwohl an dieser Stelle deutlich wird, dass sich die Reaktionszeit des Systems unter hoher Last um bis zu 50% verschlechtert, können die an das System gestellten Anforderungen bei weitem erfüllt werden.

7.7 Fazit der Kalibrierarbeiten

Im Rahmen der vorangegangenen Untersuchungen wurden eine Reihe von Komponenten des entwickelten Systems identifiziert, durch die das mögliche Genauigkeitsniveau der Ausgabedaten in Form einer dreidimensionalen Punktwolke wesentlich beeinflusst wird. Hierzu gehören insbesondere diejenigen Komponenten, die für eine zeitliche Referenzierung der Daten sorgen sowie Sensoren, bei denen nicht oder nur unzureichend berücksichtigte Einflussgrößen zu entfernungsabhängigen Fehlern führen können. Diese Systemkomponenten sind:

- Echtzeitrechner und Echtzeit-Software
- Laserscanner
- Inklinometer

Im Bezug auf die notwendige Echtzeiterfassung von Daten sind vor allem die Latenzzeiten des Echtzeitrechners zu prüfen, die wesentlich durch die gewählte Systemkonfiguration und daraus resultierende Systemlast bedingt sind. Diese müssen geeignet sein, eine ausreichend genaue Zuordnung von Scanprofilen zu dem dazugehörigen Ort sowie der räumlichen Orientierung vornehmen zu können. Da Latenzzeiten stark von der Systemkonfiguration abhängig sind, müssen sie bei einer Erweiterung des Prototypen um zusätzliche Sensoren neu bestimmt werden.

Darüber hinaus sind die im Rahmen der Kalibrierungen ermittelten Driften des Echtzeitsystems zu beachten, wenn größere Strecken bei gleichzeitiger Unterbrechung der GPS- oder GLONASS-Signale zu erwarten sind. Dies ist im wesentlichen durch die Drift der Echtzeituhr begründet, die erst nach einer Einlaufzeit von mindestens 6 Minuten linear modelliert werden kann.

Neben dem Aspekt der Referenzierung sind vor allem die beim Laserscanner vorhandenen Achsabweichungen zu bestimmen und rechnerisch anzubringen, zumal diese - wie auch die Untersuchung eines

baugleichen Scanners gezeigt hat - signifikante Größenordnungen annehmen können. Ergänzend ist jedoch anzumerken, dass nicht alle Achsabweichungen für die Messung im 2D-Profilmodus relevant sind.

Insgesamt wurde gezeigt, dass verschiedene systematische Abweichungen sowie eine Reihe nicht vollständig kompensierter Einflussgrößen quantifiziert werden konnten. Diese lassen sich entweder rechnerisch oder durch die Wahl von entsprechenden Rahmenbedingungen (Einlaufzeiten) soweit kompensieren, dass signifikante systematische Auswirkungen auf die Messgenauigkeit im Rahmen der geforderten Grenzen nicht zu erwarten sind.

8 Messung und Auswertung der Daten

8.1 Übersicht über den Mess- und Auswertevorgang

Der Weg zur Erstellung der dreidimensionalen Punktwolke eines zu erfassenden Objektes kann unabhängig von der Art des Messverfahrens in die Schritte Datenerfassung und Auswertung gegliedert werden. Ausgehend von der sehr heterogenen Sensorkonfiguration, die zur Umsetzung der gestellten Aufgabe notwendig ist, erscheint es ratsam, den Bereich der Datenerfassung zusätzlich in die Steuerung des gesamten Messsystems sowie die Datenerfassung auf der Echtzeitplattform zu untergliedern.

Eine solche Unterteilung ist im Bereich der Mobile-Mapping-Systeme nicht unüblich und richtet sich an der meist dezentralen Hardwarestruktur eines solchen Messsystems aus, die durch die Verwendung verschiedenartiger Betriebssystem- und Rechnerarchitekturen bedingt ist. Diese Struktur spiegelt sich auch in den drei Softwarelösungen des entwickelten Systems wider, welche an die Anforderungen der jeweiligen Plattform angepasst sind:

1. Steuerung des Systems sowie der Peripherie (RAMSYS Control)
2. Erfassung der Daten auf dem Echtzeitrechner (RAMSYS RT)
3. Auswertung der Daten und Erstellung der dreidimensionalen Punktwolke (RAMSYS PointCloud)

Die bereits in der Problemstellung (Kapitel 1.2) thematisierte Automatisierung des gesamten Mess- und Auswerteprozesses spielt auch bei der Konzeption der Softwaremodule eine entscheidende Rolle. Nur hierdurch ist eine durchgreifende Beschleunigung der kinematischen Objektaufnahme mit Laserscannern und somit auch die Erhöhung von Wirtschaftlichkeit und Anwenderakzeptanz möglich.

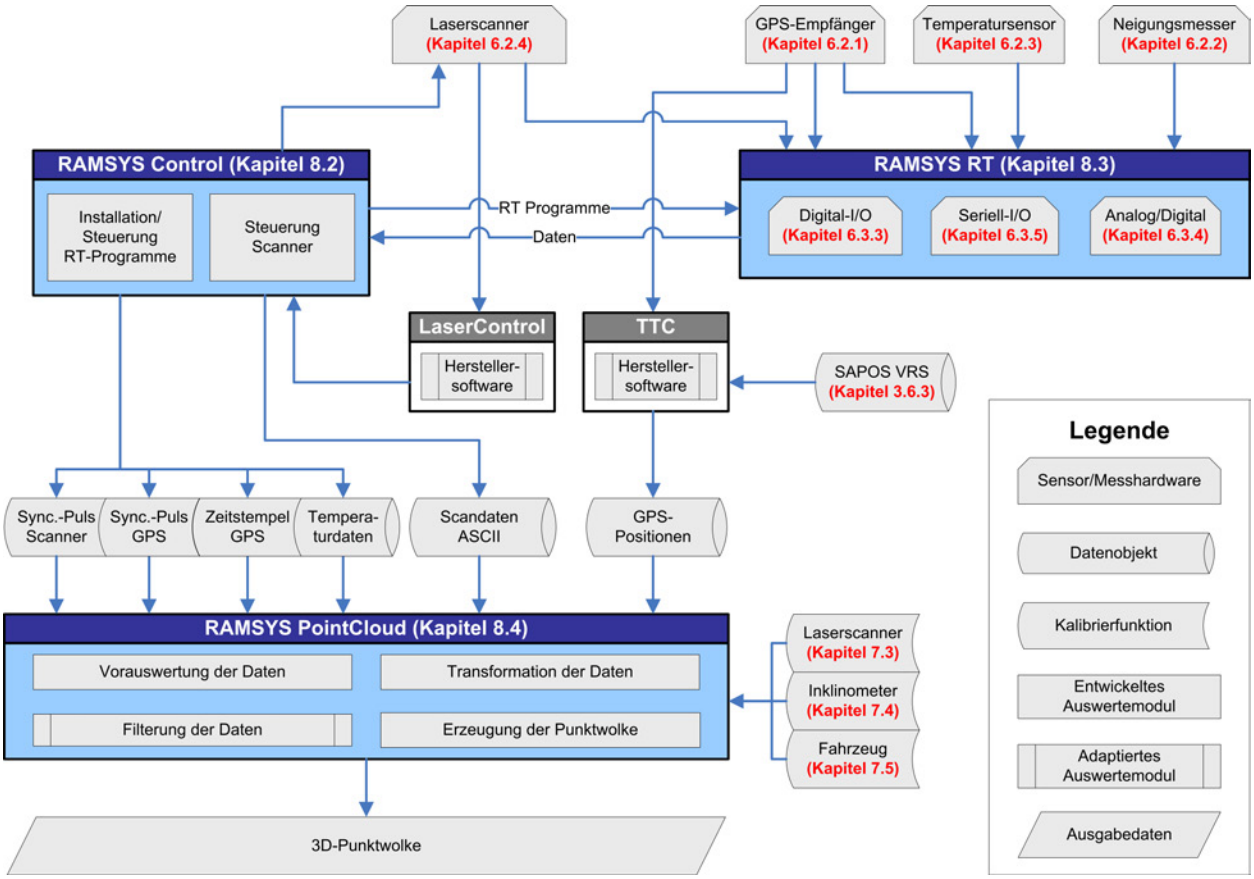


Abbildung 8.1: Der Mess- und Auswertevorgang in der Übersicht

Abbildung 8.1 zeigt die entwickelten Softwarepakete sowie den innerhalb des Systems realisierten Datenfluss in der Strukturdarstellung. Als zentrale Aufgabe des Softwaredesigns ist hierbei die möglichst nahtlose Integration verschiedener Datenquellen und die Gewährleistung eines weitgehend automatisierbaren Mess- und Auswertevorgangs zu sehen. In diesem Zusammenhang werden jedoch auch die Grenzen einer Automatisierbarkeit deutlich.

So ist die Prozessierung von GPS-Messungen mit der Software Trimble Total Control, auf deren Grundlage die Berechnung der abgefahrenen Trajektorie erfolgt, nur über eine Benutzeroberfläche steuerbar und somit nicht automatisierbar. Die Ansteuerung des Laserscanners sowie die Umwandlung der Daten in ein textbasiertes Format können durch Bibliotheksfunktionen des Herstellers erfolgen, so dass eine Interaktion mit dem Anwender nicht erforderlich ist.

Den größten Einfluss auf die Entwicklung der Steuer- und Erfassungssoftware besitzen in diesem Fall die Zielplattform und das verwendete Betriebssystem, von denen nicht nur die Wahl der Entwicklungsumgebung sondern auch die Struktur der Programme abhängen. So unterscheidet sich die Installation von Programmen auf Windows-Plattformen und dem Echtzeitrechner erheblich. Die hierzu erforderlichen Schritte werden in Kapitel 8.3.2 näher erläutert.

Tabelle 8.1 gibt einen Überblick über die Aufgaben, die Art der Programmsteuerung und die Anforderungen der jeweiligen Plattform an die Softwarekomponente.

Modul	**RAMSYS Control**	**RAMSYS RT**	**RAMSYS PointCloud**
Aufgabe	Ereignisabhängige Steuerung des Messablaufes	Echtzeiterfassung von Synchronisationssignalen und weiteren Sensordaten	Auswertung von Echtzeitdaten und Rohdaten externer Peripherie, Erzeugung der 3D-Punktwolke
Steuerung	Benutzergesteuert Events	Events Timer	Benutzergesteuert
Plattform	Windows PC	Echtzeitrechner unter OsX	Windows PC
Sprache	C++.NET	C/C++	Matlab

Tabelle 8.1: Übersicht der eingesetzten Softwarepakete

Die unterschiedlichen Aufgaben zur Steuerung, Erfassung und Datenauswertung zeigen, dass die benötigten Module auf unterschiedliche Zielgrößen hin zu optimieren sind. Bei der Steuerung des Messvorganges stehen die Transparenz der aktuellen Systemparameter, die Benutzerfreundlichkeit sowie eine unkomplizierte Anbindung der Sensorik im Vordergrund. Demgegenüber ist die Erfassung der Sensordaten durch den Echtzeitrechner mit minimaler Latenzzeit und Systemlast durchzuführen. Die Auswertung der Daten und die Erzeugung der Punktwolke im letzten Auswerteschritt erfordern aufgrund des sehr hohen Datenvolumens in erster Linie eine maximale Prozessierungsgeschwindigkeit sowie die optimale Ausnutzung der Hardwareressourcen.

8.2 Steuerung des Messablaufs

Zur Steuerung des Messablaufs sind die angeschlossenen Sensoren und Messrechner auch auf der Softwareebene in ein gemeinsames System einzubinden. Als übergeordnetes Ziel ist an dieser Stelle die nahtlose Integration der Sensoren sowie deren Steuerung durch eine zentrale Softwarekomponente zu verfolgen. Nur hierdurch können der geforderte Automationsgrad und eine benutzerfreundliche Steuerung gewährleistet werden.

Die Steuerung des Messsystems erfolgt hierbei auf einem zentralen Notebook, das gleichzeitig zur Speicherung der Scanner-Daten und als Host-System für den Echtzeitrechner verwendet wird. Somit können die im Zeitstempel des GPS-Empfängers enthaltenen Statusinformationen zur dynamischen Steuerung des Scanvorgangs genutzt werden, da sowohl die Daten des Messrechners als auch die Steuerung des Scanners auf einer gemeinsamen Plattform vollzogen wird. In diesem Zusammenhang wird der Vorteil der in Abbildung 6.22 dargestellten embedded-Lösung deutlich, bei der die MAX5dip in Verbindung mit einem Host-PC zum Einsatz kommt.

Als einziger Sensor kann die Messdatenerfassung des GPS-Empfängers nicht durch die zentrale Softwarekomponente gesteuert werden. Da die verwendeten Empfänger jedoch über ausreichend internen Speicher verfügen und die Auswertung der GPS-Beobachtungen ohnehin manuell geschehen muss, fällt diese Einschränkung weniger stark ins Gewicht.

Tabelle 8.2 zeigt die Möglichkeiten zur Ansteuerung und Datenspeicherung sowie die Nutzung von Statusinformationen der Sensoren.

Hardware	GPS	Laser-scanner	Echtzeit-rechner	Inklino-meter	Temperatur-sensor
Steuerung durch System	Nein	Ja	Ja	Ja[1]	Ja[1]
Datenspeicherung	Intern	PC[2]	PC[2]	PC[2]	PC[2]
Informationen zum Betriebszustand	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja

[1] über Echtzeitrechner [2] Steuerungs-PC oder Notebook

Tabelle 8.2: Möglichkeiten zur Steuerung und Datenspeicherung

Zur Ablaufsteuerung wurde das zentrale Programm RAMSYS-Control entwickelt, über das die Kommunikation mit der Messhardware und dem Anwender sowie die Speicherung der Daten abgewickelt wird. Die Kommunikation mit dem angeschlossenen Laserscanner wird hierbei über Bibliotheksfunktionen des Herstellers umgesetzt, die für verschiedene Windows-Betriebssysteme verfügbar sind. Ein Beispiel zur Ansteuerung eines baugleichen Leica HDS4500 wird in Paffenholz u. a. (2007) gegeben, wo dieser Scanner in einem System zur Durchführung von Überwachungsmessungen verwendet wird.

Die Objekterfassung mit RAMSYS-Control wird in den drei Phasen „Messungsvorbereitung“, „Datenerfassung“ und „Messungsabschluss“ vollzogen (Abbildung 8.2). Zunächst erfolgt eine Drehung des Scanners quer zur Längsachse des Fahrzeugs und die Installation der Echtzeitprogramme auf die MAX5dip. Da die zur Bestimmung der Orientierungsparameter des Scannersystems verwendeten Zielmarken auf der Plattform während der Messung durch zahlreiche Sensoren verdeckt sind, kann die Ausrichtung des Scanners auch mit Hilfe der in Kapitel 7.5.2 beschriebenen Referenzkugel geschehen, deren Sollkoordinaten im Fahrzeugsystem bekannt sind.

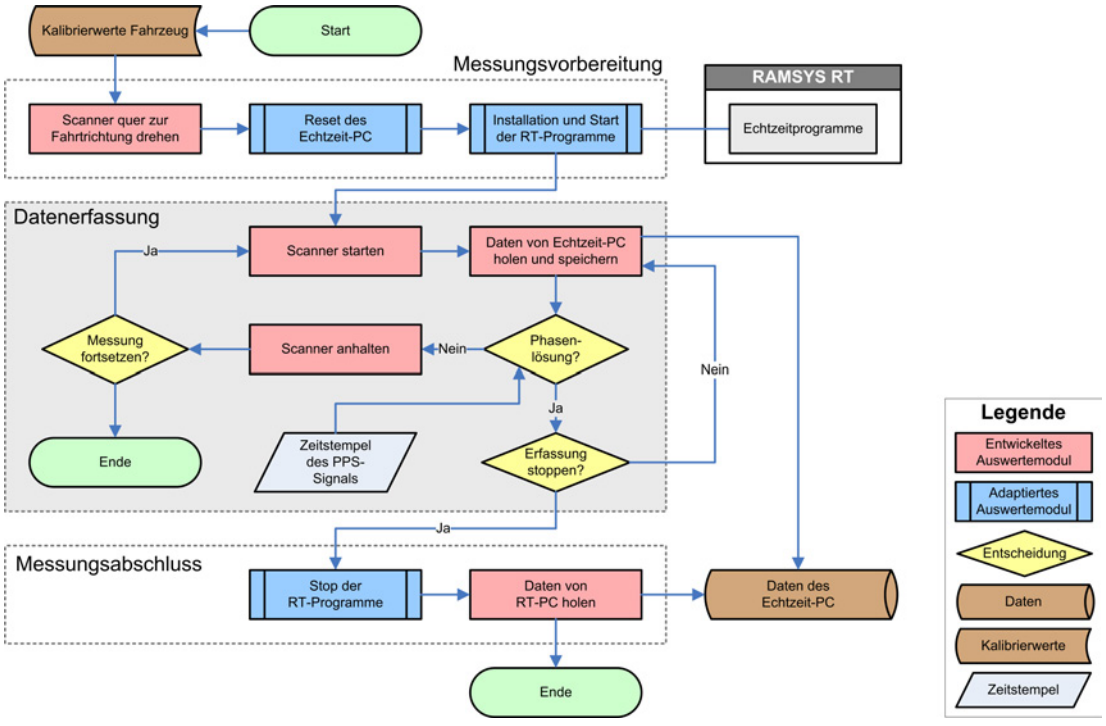


Abbildung 8.2: Workflow des RAMSYS-Control-Moduls

Nach dem Start einer Messung übernimmt RAMSYS-Control die Kommunikation mit den auf der MAX5dip laufenden Echtzeitprogrammen, die im wesentlichen aus der Speicherung der erfassten Messdaten besteht. Im Unterschied zur MAX8dip muss eine dauerhafte Speicherung der vom Echtzeitsystem erfassten Messwerte auf dem Host-PC durchgeführt werden, da die MAX5dip keine Anschlüsse für externe Speichermedien besitzt.

Der von Echtzeitrechner erfasste ASCII-Zeitstempel des PPS-Signals, in dem die Informationen über die Anzahl der Satelliten und die Art der Positionslösung enthalten sind, kann nun optional zur Steuerung des Scanvorgangs genutzt werden. So kann im Falle einer länger andauernden Unterbrechung der

Satellitensignale die Positionsbestimmung ausgesetzt werden, da eine Prädiktion der Trajektorie mit zunehmender Dauer nicht zuverlässig möglich ist. Zudem kann der aktuelle Systemzustand dem Benutzer permanent mitgeteilt werden.

Nach Beendigung einer Messung sind die verbliebenen Daten aus dem Ringpuffer des Echtzeitrechners auszulesen, um eine Datenbasis für den gesamten Messzeitraum zu gewährleisten.

8.3 Datenerfassung auf der MAX5dip

8.3.1 Anforderungen an die Software

Die Programme zur Datenerfassung mit Hilfe der MAX5dip unterscheiden sich, bedingt durch die gestellten Echtzeitanforderungen, in mehreren Punkten von den weiteren in diesem System eingesetzten Softwarelösungen. Während das Programmpaket RAMSYS-Control vornehmlich zur Interaktion mit dem Benutzer und zur Einbindung des Laserscanners in den Messprozess dient, sind die echtzeitfähigen Programme ausschließlich auf die möglichst schnelle und korrekte Erfassung externer Signalquellen ausgerichtet. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, werden hohe Anforderungen an das Betriebssystem sowie die Software hinsichtlich der Latenzzeit des Systems, der Geschwindigkeit der Datenerfassung sowie der daraus resultierenden Minimierung der Systemlast gestellt.

Aufgrund der speziellen Struktur von Echtzeitbetriebssystemen werden die vorliegenden Erfassungs-, Steuerungs- und Wartungsaufgaben in Form von Echtzeittasks umgesetzt. Das auf der MAX5dip verwendete Betriebssystem Sorcus OsX ermöglicht die gleichzeitige Installation von bis zu 1024 unabhängigen Tasks, die als Interrupt-, Timer- oder Non-Interrupt-Varianten zum Einsatz kommen (Kapitel 5.3.3).

Ausgehend von der in Abbildung 6.19 dargestellten Systemkonfiguration sind mindestens sechs Echtzeitprogramme zur Erfassung der Datensignale und zeitlichen Referenzierung notwendig, die jeweils unter einer eigenen Task installiert werden (Tabelle 8.3).

Schnittstelle		**Digital I/O**		**Seriell I/O**		**A/D**
Signal	Uhr	PPS	Scanner	PPS	Temperatur	Neigung
Erfassung von	Zeitreferenz	Logik-Pegel PPS-Signal	Logik-Pegel Scanner	ASCII-String PPS-Signal	ASCII-String Temperatur	Neigungsdaten
Steuerung	-	Interrupt	Interrupt	Timer	Timer	Timer
Priorität	1	2	3	4	6	5

Tabelle 8.3: Unter OsX installierte Tasks von RAMSYS RT

Durch die Ausführung als Interrupt oder Timer-Task können den Programmen verschiedene Prioritäten zugewiesen werden, deren Gewichtung sich hierbei nach ihrer Bedeutung für das Gesamtsystem richtet. Die Tasks zur Erfassung der digitalen Rechtecksignale von PPS-Puls und Scanner müssen in diesem Fall mit sehr hoher Priorität realisiert werden, was aufgrund der Interruptfähigkeit des X-OPT-Moduls durch Installation als II-Task gelingt. Die analog-digital-Wandlung auf dem X-AD-Modul, über das die Neigungswerte des Inklinometers aufgezeichnet werden, kann ebenso wie die Erfassung des PPS-Zeitstempels mit Hilfe von timergesteuerten TI-Tasks vollzogen werden. Die hierbei zulässigen Latenzzeiten liegen mit weniger als 0.5 Sekunden in einem für das vorliegende Echtzeitsystem unkritischen Bereich und können mit niedriger Priorität erfolgen. Gleiches gilt für die ebenfalls über die serielle Schnittstelle durchgeführten Temperaturmessungen, weshalb das entsprechende Programm unter einer aperiodisch aufzurufenden NI-Task installiert wird.

Neben den beschriebenen Tasks zur Erfassung von Sensordaten ist eine spezielle Task auf Betriebssystemebene notwendig, die für die Verwaltung der Echtzeituhr zuständig ist. Auf diesem Wege ist es möglich, den genauen Erfassungszeitpunkt eines Signals durch die Nutzung eines der vorhandenen Hardware-Timer mit einer Auflösung von 0.84 μs zu referenzieren. Das dieser Task zugrunde liegende Eindeutigkeitsproblem der Timer-Bausteine kann Kapitel 8.3.3 entnommen werden. Um eventuelle Driften der Echtzeituhr weitgehend zu minimieren, benötigt das für diese Aufgabe eingesetzte Programm die höchste Priorität aller installierten Tasks. Aufgrund der Interruptfähigkeit der Timerbausteine kann ein Timer des CPU-Moduls dazu genutzt werden, diese Softwarekomponente als II-Task mit maximaler Priorisierung zu installieren.

8.3.2 Struktur und Installation von Echtzeitprogrammen

Zum genaueren Verständnis der Funktionsweise des Echtzeitbetriebssystems OsX ist grundsätzlich zwischen der Übertragung einer compilierten und ausführbaren Binärdatei (Programm) in den Hauptspeicher des CPU-Moduls und der eigentlichen Installation eines Programms unter einer Echtzeittask (installierte Task) zu differenzieren. Unter OsX erfolgt die Installation eines Programms unter einer Echtzeittask beliebigen Typs mehrstufig und unterscheidet sich grundlegend vom Installationsvorgang konventioneller Betriebssysteme.

Für den Betrieb eines Echtzeitprogramms unter einer Task müssen zunächst zwei Abschnitte im Hauptspeicher des CPU-Moduls, der Daten- und der Parameterbereich, eingerichtet werden. Der Datenbereich einer Task wird ebenso wie der Parameterbereich in Hauptspeicher des CPU-Moduls angelegt und dient zur Speicherung beliebiger Daten, wie zum Beispiel Messwerten. Während der Datenbereich gegenüber Zugriffen durch Echtzeitprogramme gekapselt ist und ein Zugriff nur über Bibliotheksfunktionen (MDD) möglich ist, kann der Parameterbereich einer Task auch durch direkte Adressierung angesprochen werden. Dies kann sowohl durch das unter einer Task installierte Echtzeitprogramm, als auch von anderen auf dem System laufenden Tasks geschehen, was der in Kapitel 5.2.10 beschriebenen Kommunikationsform über gemeinsamen Speicher entspricht. Der Parameterbereich dient zur Speicherung von Konfigurationsvariablen des Programms, wie etwa der Abtastrate oder den Kennziffern der abzufragenden Schnittstellen.

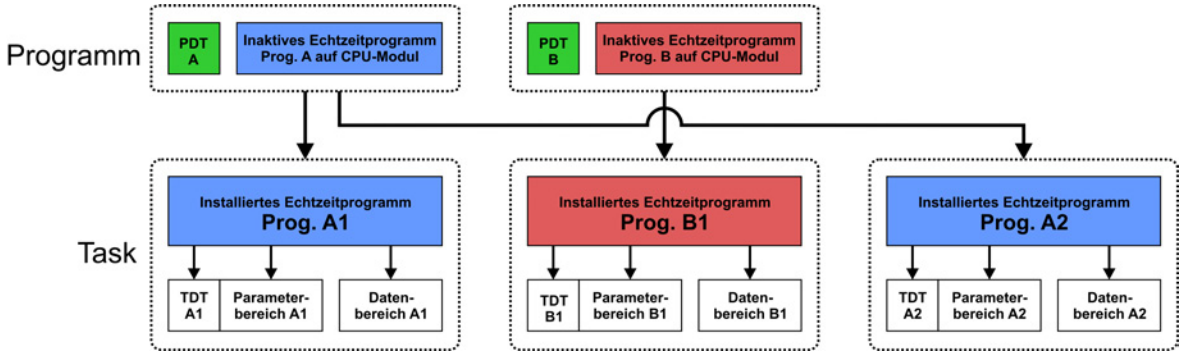


Abbildung 8.3: Bestandteile eines Programms unter OsX

Neben dem Daten- und dem Parameterbereich werden für den in Abbildung 8.3 dargestellten Installationsvorgang eines Programms zwei betriebssysteminterne Tabellen angelegt, die mit „Task-Descriptor-Table“ (TDT) und „Program-Descriptor-Table“ (PDT) bezeichnet werden. Die PDT ist fester Bestandteil eines jeden Echtzeitprogramms und wird bereits zur Entwurfszeit festgelegt. Sie beinhaltet allgemeine Informationen über das zu installierende Programm, wie die Größe von Daten- und Parameterbereich, den Typ der Task, unter der das Programm zu installieren ist, die entsprechende Interrupt-Nummer sowie die Adressbereiche der in Tabelle 8.4 genannten Taskprozeduren. Die Task-Descriptor-Table steht direkt vor dem Parameterbereich einer Task und beinhaltet Informationen zur Verwaltung und Installation der Task. Hierzu gehören zum Beispiel die Priorität (nur bei TI-Tasks) und die Interrupt-Nummer der Task (nur bei II-Tasks).

Wird die Einrichtung von Daten- und Parameterbereich sowie der TDT dem Betriebssystem überlassen, so kann eine vollständige Trennung zwischen dem eigentlichen Programmcode und den notwendigen Betriebssystemstrukturen erreicht werden. In diesem Fall ist auch die in Abbildung 8.3 angedeutete Mehrfachinstallation eines Programmes unter verschiedenen Tasks möglich, da die individuelle Konfiguration der Task über spezielle Prodeduren vorgenommen wird, die auch außerhalb der Task aufrufbar sind.

Prozedur	**Einsatzbereich**
Main	Initialisierung der Program-Descriptor-Table und Installation unter einer Task
Auto_init	Initialisierung der Task-Descriptor-Table (auch vom Host-PC aus möglich)
Main_callback	Ausführung des Programmcodes bei Aufruf der Task
Start	Aktivierung der Task
Stop	Deaktivierung der Task

Tabelle 8.4: Prozeduren einer Task

Ein weiterer Unterschied zur PC-basierten Programmierung besteht in den vorgeschriebenen Prozeduren eines Programmes, die während seiner Übertragung auf die MAX5dip, seiner Installation sowie beim Aufruf der zugrundeliegenden Task ausgeführt werden (Tabelle 8.4).

Die main-Prozedur enthält im Gegensatz zur DOS- und Windows-Programmierung lediglich die für das Betriebssystem wesentlichen Parameter zur Einrichtung der PDT sowie zur Anmeldung des Programmes als OsX-Task. Nach Ausführung dieser Funktion ist die Task lediglich eingerichtet, kann jedoch noch nicht durch Interrupts oder Timer aufgerufen werden. Im Anschluss an die Initialisierung der TDT erfolgt dann die Einrichtung eines Ringpuffers im Datenbereich, das Öffnen der Schnittstellen sowie die Aktivierung der Task durch die Start-Prozedur. Ab diesem Zeitpunkt ist die Task in der Lage, auf Ereignisse zu reagieren oder timergesteuerte wahrzunehmen. Dieser Schritt kann durch Verwendung der Stop-Prozedur wieder rückgängig gemacht werden.

Wie bereits diskutiert, müssen nach dem Einschalten der MAX5dip sowohl das Betriebssystem als auch die kompilierten Echtzeitprogramme in den Arbeitsspeicher des CPU-Moduls übertragen und dort installiert werden. Für eine solche Installation können je nach Einsatzbedingungen des Trägersystems unter anderem die in Tabelle 8.5 genannten Möglichkeiten genutzt werden.

Quelle	**Installationsweg**	**Vor-/Nachteile**
Host-PC	Bibliotheksfunktionen des Treibers	Flexibel bei Softwareänderungen
Max-PC	Skriptgesteuerte Installation aus dem ROM des Max-PC	Kein Host-PC notwendig

Tabelle 8.5: Installationsmöglichkeiten für Echtzeitprogramme

Die Installation mit Hilfe von Bibliotheksfunktionen durch ein auf dem Host-PC laufendes Anwenderprogramm ist die flexiblere Lösung, da hierbei jederzeit Änderungen der Programme oder ihrer Konfiguration möglich sind. Der Nachteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass nach jedem Systemstart ein Host-PC mit allen notwendigen Treibern und einer Anwendersoftware zur Übertragung und Installation der Echtzeitprogramme benötigt wird, um den Messprozess zu starten.

Soll das Echtzeitsystem hingegen im Stand-alone-Betrieb ohne Verbindung zum Host-PC genutzt werden, können die Echtzeitprogramme alternativ im nicht-flüchtigen ROM des CPU-Moduls zusammen mit einem Installationsskript abgelegt werden. Dieses wird nach der Inbetriebnahme der MAX5dip selbstständig ausgeführt und installiert alle vorhandenen Programme unter einer den Vorgaben entsprechenden Task. Der entscheidende Nachteil dieser Variante ist jedoch, dass die Datenspeicherung über den gesamten Messzeitraum im RAM des CPU-Moduls vorgenommen werden muss, was bei hohen Abtastraten, einer großen Anzahl an Schnittstellen oder langen Messkampagnen nicht immer möglich ist. Darüber hinaus ist eine Modifikation der kompilierten Programme oder ihrer Parametertabellen nur in Verbindung mit einer erneuten Übertragung ins ROM der CPU möglich.

8.3.3 Timer- und ereignisgesteuerte Programmierung

Die Programmierung von Systemen zur Erfassung asynchron auftretender Datensignale erfordert, unabhängig von Echtzeitanforderungen, häufig ereignisgesteuerte Funktionsaufrufe (Abbildung 8.4). Bei sehr geringen Anforderungen an die Latenzzeit kann eine Signalerfassung auch durch regelmäßige Abfrage von Schnittstellen in vordefinierten Intervallen erfolgen. Eine solche Vorgehensweise ist jedoch für Echtzeitanforderungen nicht umsetzbar, da dies zu einer erheblichen Prozessorlast aufgrund häufiger Abfragen führt.

Soll eine ereignisgesteuerte Messdatenerfassung realisiert werden, kommen aus diesem Grund in der Regel Interrupts zur Anwendung. Zur Auslösung von Interrupts und somit zur Ausführung bestimmter Programmfunktionalitäten können je nach Anwendung die Pegel von Digital- und Analogeingängen sowie Zähler- oder Timermodule genutzt werden. Nach einer Interruptauslösung wird unter OsX diejenige Task durch das Betriebssystem aktiviert, der die entsprechende Interruptnummer während der Installation zugewiesen wurde. Innerhalb der hierdurch aktivierten Task wird direkt die in der PDT mit „Main_callback“ bezeichnete Prozedur ausgeführt, die auch als „callback-Funktion“ bezeichnet wird.

Neben der Programmsteuerung durch Interrupts besteht zudem die Möglichkeit der regelmäßigen Aktivierung von Tasks über Timeraufrufe (Abbildung 8.4). Im Fall des verwendeten CPU-Moduls X-MAX-E

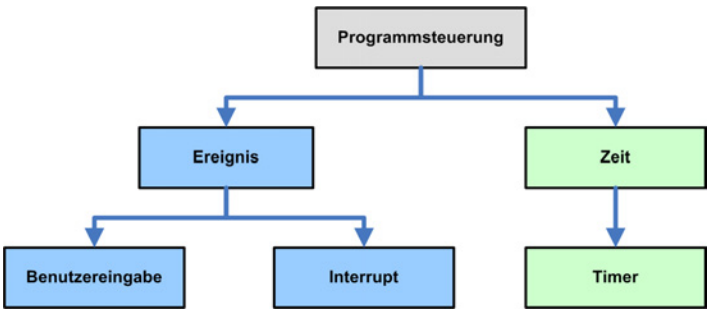


Abbildung 8.4: Arten der Ablaufsteuerung von Programmen

stehen insgesamt drei nutzbare Timer für Anwendungsprogramme zur Verfügung. Zwei dieser Timer sind zudem interruptfähig und können somit zur Aktivierung von Interrupt-Tasks verwendet werden. Ein weiterer Timer ist zur Steuerung von Programmen oder Wartungsfunktionen mit Hilfe von Timer-Tasks nutzbar. Interrupt- und Timeraufrufe unterscheiden sich aus Sicht der Echtzeitprogramme vor allem durch die Art des Schedulings sowie die Möglichkeiten zur Priorisierung.

Die Eingangsfrequenz des auf dem CPU-Modul verwendeten Timerbausteins beträgt $1,189,180$ Hz, so dass der kleinstmögliche Taktschritt $\Delta t_{Timer,min}$, der auch als „Timer-Tick“ bezeichnet wird, mit

$$\Delta t_{Timer,min} = 0.84\ \mu\text{s}. \tag{8.1}$$

angegeben werden kann. Die Inkrementierung der Timer-Ticks wird vom Betriebssystem mit Hilfe einer Zählvariablen durchgeführt. Durch die bei 80486 Prozessoren und dem OsX-Betriebssystem verfügbare Busbreite von 16 Bit können somit 65536 Taktschritte bis zu einem Überlauf ausgeführt werden, der den Eindeutigkeitsbereich des Timers begrenzt. Hierdurch ist der nutzbare Frequenzbereich durch Einsatz von Timern auf $f_{min} = 18.14$ Hz begrenzt.

Dieser Frequenzbereich ist für viele Messaufgaben und insbesondere für die Datenerfassung in Mobile-Mapping-Systemen nicht ausreichend, da eine Reihe von Tasks mit geringerer Häufigkeit zu aktivieren ist. Eine zusätzliche Skalierung dieses Bereiches ist durch softwareseitige globale Zählvariablen möglich, die bei einem Überlauf des Timers interruptgesteuert inkrementiert werden. Bei Verwendung einer 16 Bit breiten Variablen ergibt sich somit ein erweiterter Eindeutigkeitsbereich des Timers $\Delta t_{Timer,ext}$ von:

$$\Delta t_{Timer,ext} = 3611.7\ \text{s} \tag{8.2}$$

Zur Vermeidung von Unstetigkeiten und Driften des Timers muss die Inkrementierung der softwareseitigen Zählvariablen möglichst hoch priorisiert sein. Eine Genauigkeitsuntersuchung der Systemuhr unter Verwendung des PPS-Signals eines GPS-Empfängers kann Kapitel 7.6.2 entnommen werden.

8.3.4 Zugriff auf die Messhardware

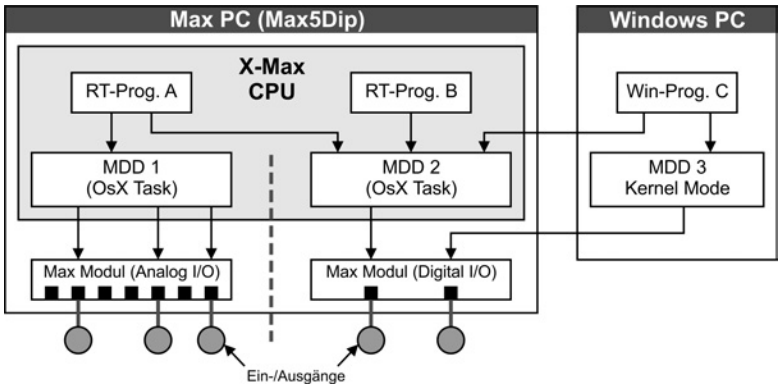


Abbildung 8.5: Zugriff auf Schnittstellen über Module-Device-Driver

Der Zugriff auf die Komponenten der Sorcus-Hardware geschieht mit Hilfe sogenannter „Module-Device-Driver“ (MDD), die während der Programminstallation statisch ins ROM des CPU-Moduls zu

laden sind. Diese multitaskingfähigen Treiber dienen der Abstraktion des Hardwarezugriffs und liegen für die Betriebssysteme Windows und OsX vor.

Sowohl Schnittstellen als auch Funktionseinheiten wie LED eines Moduls werden hierbei über modulspezifische MDD angesprochen, deren Funktionen auf die jeweilige Hardware abgestimmt sind. Hierdurch sollen die Portierbarkeit und der Austausch von zentralen Hardwarekomponenten ohne Anpassung des Programmcodes gewährleistet werden.

Abbildung 8.5 verdeutlicht das den MDD zugrunde liegende Konzept. Diese können sowohl als Tasks auf der Max-CPU als auch in Form eines Kernel-Mode-Treibers auf einem angeschlossenen Host-System und Windows laufen. Die Entkopplung des direkten Hardwarezugriffs durch MDD sorgt dafür, dass mehrere Programme der Echtzeitplattform und Programme eines angeschlossenen Host-PC quasi gleichzeitig auf die Schnittstellen eines Moduls zugreifen können, sofern diese nicht von einer der Tasks mit Hilfe exklusiver Zugriffsrechte blockiert sind. Der von einem Host-PC aus durchgeführte Zugriff wird über die in Kapitel 5.2.10 vorgestellte Nachrichtenkommunikation mit SRQ umgesetzt. Aus diesem Grund kann für Zugriffe vom Host-PC aus keine Echtzeitfähigkeit gewährleistet werden.

8.3.5 Funktionsweise einer Echtzeit-Task

Die gesamte Datenerfassung auf der MAX5dip wird durch die in Tabelle 8.3 beschriebenen Programme umgesetzt, die als Echtzeittasks unter dem Betriebssystem OsX laufen und im Folgenden als RAMSYS-RT-Module bezeichnet werden sollen. Nach der Übertragung auf das CPU-Modul, der Initialisierung aller Betriebssystemtabellen sowie der Installation unter einer Task (Kapitel 8.3.2) erfolgt die eigentliche Umsetzung der gewünschten Programmfunktionalität (Abbildung 8.6) über diese Programme.

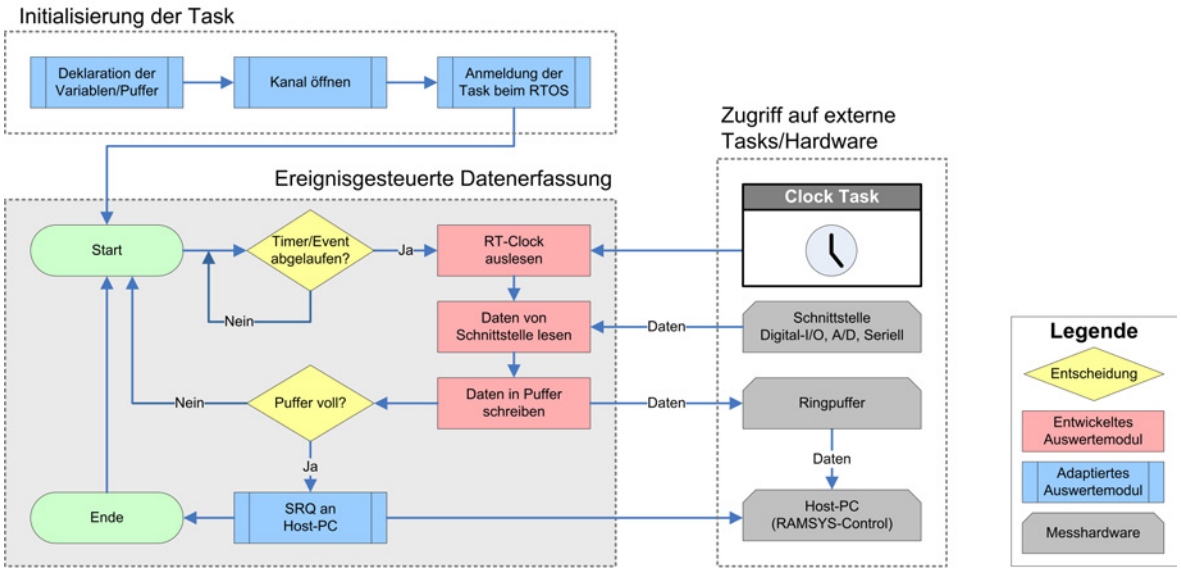


Abbildung 8.6: Workflow der RAMSYS-Realtime-Module

Mit Ausnahme des unter einer NI-Task installierten Moduls, das in unregelmäßigen Abständen durch den Scheduler aufgerufen wird, erfolgt die Aktivierung der jeweiligen Task durch Ablauf eines Timers oder die Auslösung eines definierten Interrupts. Die unverzügliche Abfrage der Echtzeituhr wird mit Hilfe des in Kapitel 8.3.2 beschriebenen Zugriffs auf den Parameterbereich der Uhr-Task vorgenommen, in dem die Werte aller Timer-Variablen vorgehalten werden.

Im nachfolgenden Schritt werden die Messwerte über den Kanal der zugeordneten Schnittstelle erfasst. Dies ist jedoch nur für analoge und serielle Schnittstellen notwendig, da die Messinformation bei digitalen Signalen bereits durch die Interruptauslösung als solche gegeben ist, so dass der Schnittstellenzugriff in diesem Fall unterbleibt.

Zur schnellen Zwischenspeicherung der Daten und ihrer Erfassungszeitpunkte stellt das Betriebssystem bis zu 256 unabhängige Ringpuffer zur Verfügung, deren Zugriff nach dem FIFO-Prinzip (First In First Out) geregelt ist. Hat der Puffer einen bestimmten Füllstand erreicht, wird über das Handle zum Host-PC ein codierter Service-Request (SRQ) abgesetzt (Kapitel 5.2.9), der den Host-PC zur Leerung des Datenpuffers auf dem Echtzeitrechner veranlasst. Wie in Kapitel 9.2.2 gezeigt wird, besitzt ein Zugriff

des Host-PC auf den Ringpuffer einen signifikanten Einfluss auf die Determiniertheit des Systems und sollte somit nicht zu häufig ausgeführt werden.

Falls sichergestellt ist, dass alle Daten nach Beendigung einer Messung aus dem Ringpuffer gelesen und auf dem Host-PC abgespeichert werden, kann diese Schleife ohne Abbruchbedingung ausgeführt werden. Eine Funktion zur Deaktivierung einer Task ist zwar implementiert, wird jedoch für die vorliegende Aufgabe nicht benötigt.

8.3.6 Ansätze zur Optimierung der Systemleistung

Bei knappen Systemressourcen sind neben dem Einsatz eines zusätzlichen CPU-Moduls auch Maßnahmen zur Optimierung der Systemleistung möglich, die im Folgenden diskutiert werden sollen:

- Im Hinblick auf die realisierte Programmlogik ist zur Erfassung asynchroner Ereignisse stets die Verwendung von Interrupts anstelle der Erfassung mit Hilfe periodischer Taskaufrufe umzusetzen. Insbesondere bei Multitasking-Betriebssystemen ermöglicht ein ereignisgesteuerter Programmablauf die parallele Verarbeitung weiterer Aufgaben. Die bei Singletasking-Systemen verwendeten Endlosschleifen zur Erfassung von Ereignissen führen in der Regel zu einer Prozessorlast von nahezu 100%, wodurch eine Echtzeitfähigkeit verhindert wird.

- Bei der Übertragung von Messdaten auf einen angeschlossenen Host-PC sollte auf die Übertragung kleinerer Datenblöcke verzichtet werden, da jede Datenübertragung mittels eines SRQ von der MAX5dip zum Host-PC initiiert wird. Der Host-PC überträgt die Daten durch Nutzung von Bibliotheksaufrufen in seinen Speicher, wodurch ein Overhead zwischen Steuer- und Nutzdaten entsteht. Aus diesem Grund sollten alle Messdaten zunächst im RAM der Max-CPU zwischengespeichert und in Blöcken von mehreren kByte bis zu wenigen MByte übertragen werden. Die Größe der Datenblöcke ist anhand der Auslastung des Max-PC zu optimieren.

- Auftretende Ereignisse, die zur Steuerung des Messprozesses genutzt werden sollen, sind nach Möglichkeit nicht durch Service-Requests an das Host-System weiterzugeben, sondern direkt auf der Max-CPU zur Ablaufsteuerung zu verwenden. Dies ist in erster Linie durch die Reaktionszeit des unter Windows laufenden Host-Systems begründet, dessen Latenzzeiten weder prädizierbar noch beeinflussbar sind und somit Echtzeitanforderungen nicht erfüllen können. Darüber hinaus werden SRQ auf dem Max-PC durch NI-Tasks verwaltet, die eine geringe Priorität gegenüber Interrupt- und Timer-Tasks besitzen (Kapitel 5.3.3).

- Die Geschwindigkeit der Datenerfassungsmodule kann zusätzlich erhöht werden, wenn auf verschiedene Prüfmechanismen innerhalb der MDD verzichtet wird. Dies betrifft die Konsistenzprüfung anwenderspezifischer und betriebssysteminterner Parameter und Funktionsaufrufe. Ein Verzicht auf Prüfungen dieser Art ist nach erfolgreichem Test eines konfigurierten Systems möglich. Die Prüfung einzelner Datenmodule auf Hardwarefehler kann jedoch nicht umgangen werden.

- Eine zusätzliche Möglichkeit zur Steigerung der Erfassungsgeschwindigkeit bei sehr hohen Datenraten besteht in der Ausgabe von Rohdaten der jeweiligen Schnittstellen. Am Beispiel eines A/D-Wandlungsmoduls kann die Ausgabe unkorrigierter Rohdaten erfolgen, die standardmäßig in Mikrovolt (μV) oder Nanoampere (nA) angegeben werden.

8.4 Auswertesoftware (RAMSYS PCloud)

8.4.1 Workflow

Die eigentliche Auswertung der gemessenen Daten, die zur Erstellung der dreidimensionalen Punktwolke führt, wird in drei Schritten vollzogen, deren Abläufe in Abbildung 8.7 dargestellt sind.

Grundlage für dieses Modul sind die vollständig ausgewerteten kinematischen GPS-Einzelpositionen der abgefahrenen Trajektorie, die durch den Echtzeit-PC erfassten Daten sowie die vom Scanner ausgegebenen Profildaten im ASCII-Format.

Die Prozessierung der Daten erfolgt hierbei in drei wesentlichen Schritten. In einem ersten Schritt werden die Daten in diesem Programm einer Vorauswertung unterzogen. Im Anschluss an die Aufbereitung

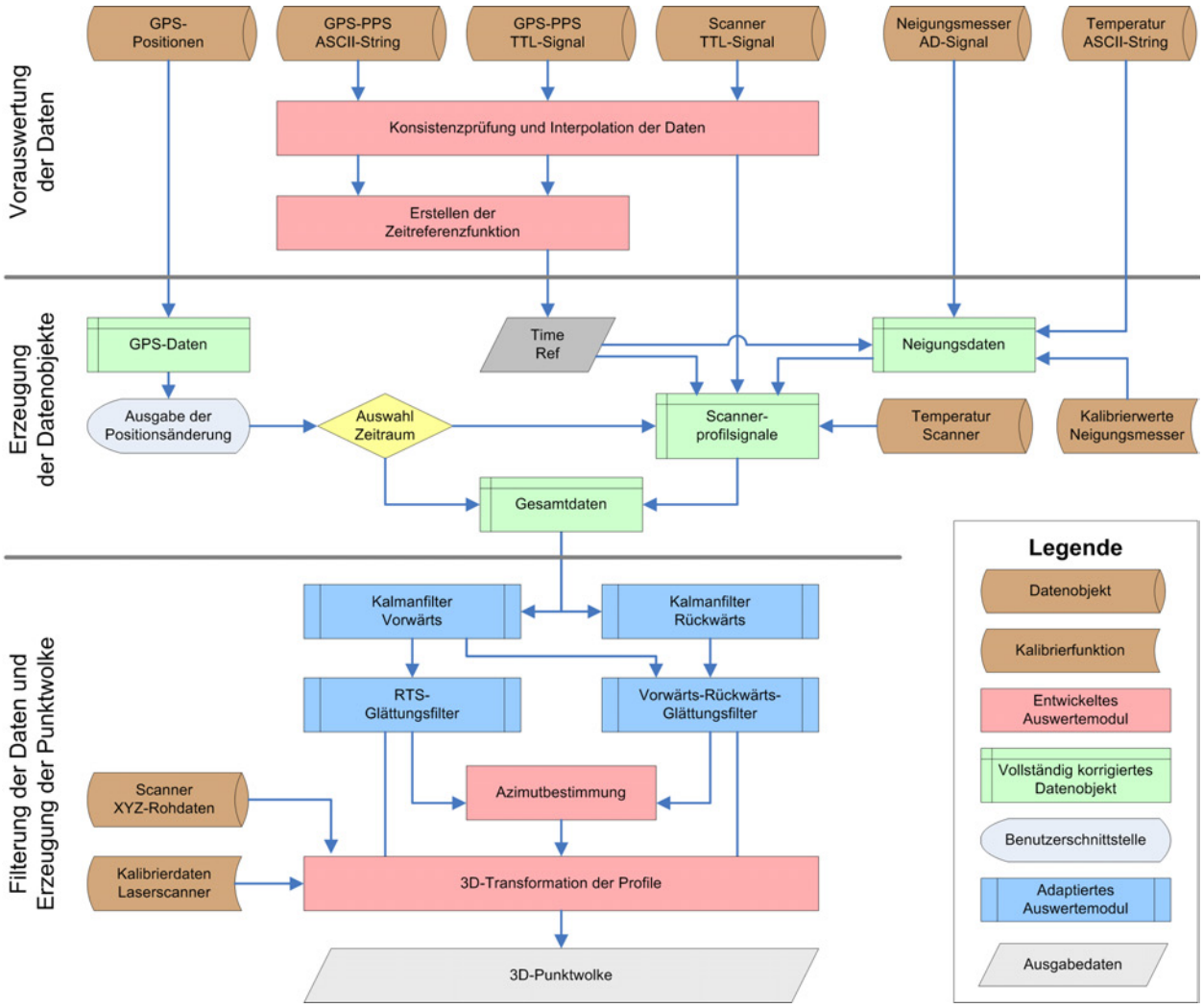


Abbildung 8.7: Workflow des RAMSYS-PointCloud-Moduls

werden alle notwendigen Datenobjekte erzeugt, auf deren Grundlage dann im dritten Schritt eine Filterung im Kalman-Filter-Algorithmus mit anschließender Glättung der Trajektorie stattfindet. Um die abschließende Transformation der Profilmessungen zu einer Gesamtpunktwolke durchführen zu können, sind zunächst die Azimute der einzelnen Profilzeitpunkte zu berechnen. Endergebnis der Auswertung ist die vollständig entzerrte und um die Bewegung der mobilen Plattform korrigierte dreidimensionale Punktwolke.

8.4.2 Vorauswertung der Daten

Die Vorauswertung der Daten setzt direkt auf den Daten der digitalen Signalzeitpunkte von GPS-Empfänger und Scanner auf, die durch den Echtzeit-PC erfasst und abgespeichert wurden. Hierunter fallen nicht die eigentlichen Nutzdaten wie GPS-Positionen und Scannerrohdaten, deren Verfügbarkeit erst im folgenden Auswerteschritt (Kapitel 8.4.3) erforderlich ist. Die Vorauswertung besteht im Wesentlichen aus der Konsistenzprüfung und Korrektur der Daten sowie der anschließenden Erzeugung eines Zeitreferenzobjekts zur Überführung der Systemzeit des Echtzeit-PC in die UTC-Zeitskala.

Im Rahmen der Konsistenzprüfung erfolgt eine Prüfung auf Äquidistanz der Abtastzeitpunkte, da diese für den weiteren Auswertegang entscheidend ist. Bei einer Abweichungen von mehr als 1% vom Sollwert ist davon auszugehen, dass ein Ausreißer oder eine der in Kapitel 7.6.2 beschriebenen Signalverzögerungen vorliegt. Aus diesem Grund werden die entsprechenden Epochen zunächst gelöscht und die fehlenden Zeitmarken im folgenden Schritt zusammen mit vorhandenen Abtastlücken interpoliert.

Die nach diesem Schritt kontinuierlich und gleichabständig vorliegenden Abtastzeitpunkte werden in der Folge dazu verwendet, ein Zeitreferenzobjekt zu erstellen. Dieses definiert den Zusammenhang zwischen der Systemzeit des Echtzeit-PC und dem vom GPS-Empfänger ausgegebenen Zeitsignal in Form

des PPS-Pulses und dem korrespondierenden ASCII-String (Kapitel 6.2.1). Somit kann eine Umrechnung zwischen der Zeitskala des RT-PC und der UTC-Zeit prinzipiell über funktionale Zusammenhänge oder mit Hilfe einer Look-Up-Table (LUT) erfolgen. Die Drift der GPS-Zeitskala kann unter Berücksichtigung der Genauigkeitsanforderungen an das System vernachlässigt werden.

Je nach Datenbasis ist auch die Interpolation von GPS-Beobachtungen (Kapitel 3.6.4) Teil der Vorauswertung. Sie kann auch außerhalb dieses Softwaremoduls erfolgen, ist jedoch vor der eigentlichen Prozessierung der GPS-Daten vorzunehmen.

8.4.3 Erzeugung der Datenobjekte

Für die weitere Auswertung sind die Datenobjekte für die beiden in diesem System wesentlichen Sensoren zu erzeugen. Dies sind:

1. GPS-Positionen
2. Erfassungszeitpunkte der Scanprofile

Die Datendatei mit den ausgewerteten und in das Gauß-Krüger-System transformierten GPS-Positionen enthält folgende Informationen:

$$Daten_{GPS} = [\text{R, H, Hoe, } \sigma_R,\ \sigma_H,\ \sigma_{\text{Hoe}},\ \text{PDOP, NumSats, SolType}],$$

R, H	Rechts- und Hochwert
Hoe	Ellipsoidische Höhe
σ_R, σ_H	Standardabweichungen von R und H
σ_{Hoe}	Standardabweichung der Höhe
$PDOP$	Position Dilution of Precision
$NumSats$	Anzahl der Satelliten
$SolType$	Art der Positionslösung

Mit Hilfe der GPS-Positionen werden zunächst die abgefahrene Trajektorie im Grundriss (Abbildung 8.8) sowie die Positionsänderungen in Abhängigkeit von der Zeit (Abbildung 8.9) grafisch dargestellt. Letztgenannte Darstellung soll die numerische Auswahl des Auswertungszeitraumes erleichtern, da hierin nicht nur Stillstands- und Fahrtzeiten, sondern auch Bereiche mit stark verrauschten Positionsinformationen - gleichbedeutend mit großen Positionsänderungen - sowie Bereiche mit fixed- und float-Lösungen dargestellt und gegebenenfalls von der Auswertung ausgeschlossen werden können.

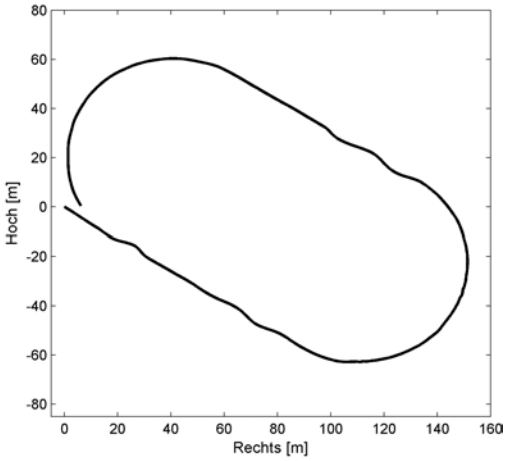


Abbildung 8.8: Trajektorie in der Übersicht

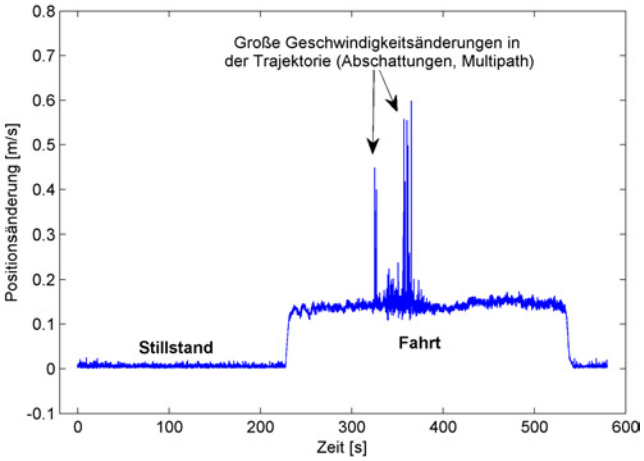


Abbildung 8.9: Positionsänderungen

Da die zeitliche Referenzierung aller Daten bei diesem System in UTC-Zeit vorgenommen wird, ist eine Transformation der Zeitskala nicht notwendig. Es ist jedoch zu beachten, dass beim Datenexport aus bestimmten Softwarelösungen zur Prozessierung von GPS-Beobachtungen eine nicht aktuelle Anzahl

an Schaltsekunden berücksichtigt wird, wodurch sich ein Versatz der GPS-Position zum entsprechenden Scanprofil ergeben kann.

Die durch die Schaevitz-Libelle erfassten Neigungswerte sind zeitlich auf die Uhr des Echtzeitrechners bezogen und müssen somit durch das Zeitreferenzobjekt in UTC transformiert werden. Nach der Transformation werden die Neigungsdaten mit Hilfe der im Labor bestimmten Kalibrierfunktion und der Temperaturmessungen um systematische Effekte korrigiert und von der elektrischen Größe Volt in die geometrische Größe gon umgerechnet. Aufgrund des hohen Rauschniveaus der Neigungswerte werden diese zusätzlich mit einem Median-Filter tiefpassgefiltert.

Analog zu den Neigungswerten werden auch die Zeitmarken der Laserscannerprofile in UTC überführt. Die hochfrequent erfassten Neigungsdaten können nun dazu verwendet werden, jedem Scanprofil einen Wert für seine Querneigung zum Zeitpunkt der Messung zuzuweisen. Diese werden bei der abschließenden Transformation der Einzelprofile in eine Gesamtpunktwolke zur Korrektur des Rollwinkels verwendet.

Abschließend wird ein gemeinsames Datenobjekt für GPS-Positionen und Profilzeitpunkte des Scanners gebildet, auf dem die nachfolgende Filterung und Glättung aufsetzt.

8.4.4 Bestimmung der Startwerte für die Filterung

Die Bestimmung der Startwerte ist ein wichtiger vorbereitender Schritt einer jeden Kalman-Filterung. Der in Kapitel 3.4.1 beschriebene Algorithmus setzt die Kenntnis des Zustandsvektors $\boldsymbol{y}_0$ sowie seiner VKM $\boldsymbol{\Sigma}_{yy,0}$ voraus, deren Werte jedoch in aller Regel unbekannt sind und geeignet abgeschätzt werden müssen. Werden hier deutlich unrealistische Startwerte gewählt, so kann es zu einer Divergenz der Filterergebnisse kommen.

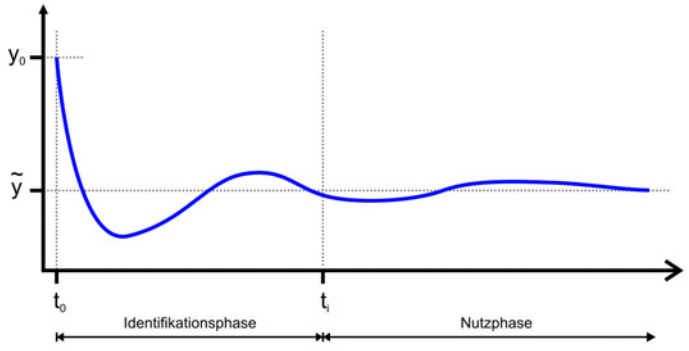


Abbildung 8.10: Phasen der Kalman-Filterung
(Welsch u. a., 2000)

Ziel der Bestimmung von Startwerten ist es, die in Abbildung 8.10 gezeigte Initialisierungsphase so kurz wie möglich zu halten, um ohne große Zeitverzögerung zu einem nutzbaren Schätzwert für den Zustandsvektor zu kommen. Im Gegensatz zu Anwendungen des Kalman-Filters in der Analyse von Netzmessungen kann der Eintritt in die Nutzphase beim vorliegenden System durch die vergleichsweise hohe Abtastrate von 10 Hz des GPS-Empfängers deutlich schneller herbeigeführt werden, da eine höhere Anzahl an Beobachtungsepochen verfügbar ist.

Zur Abschätzung des Startzustands und seiner VKM wird der Mittelwert der Messungen für die ersten Epochen verwendet, um Startwerte für die Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu ermitteln. Der Vektor $\boldsymbol{y}_0$ ergibt sich somit durch:

$$\boldsymbol{y}_0 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \dot{\boldsymbol{x}} \\ \ddot{\boldsymbol{x}} \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2} \boldsymbol{x}_i \\ \frac{1}{3\Delta t}\sum_{i=1}^{3} \boldsymbol{x}_i \\ \frac{1}{4\Delta t}\sum_{i=1}^{4} \dot{\boldsymbol{x}}_i \end{bmatrix} \tag{8.3}$$

Es ist anzumerken, dass durch Annahme konstanter Beschleunigungen über vier Epochen eine Konstanz von Position und Geschwindigkeit zwar nicht gegeben ist, jedoch dienen diese Werte lediglich zur Ermittlung von Näherungswerten, die ohnehin varianzbehaftet sind.

Neben der Ermittlung der Startwerte für den Zustandsvektor sind zudem noch die in seiner VKM angegebenen Unsicherheiten abzuschätzen. Hierbei kann auf die von Pelzer (1987) vorgeschlagene Vorgehensweise zurückgegriffen werden. Im Falle der Beschleunigung kann der maximal denkbare Wert der Beschleunigung verwendet werden, aus dem sich die Abweichung

$$\epsilon_{\dot{x},max} = \hat{\dot{\boldsymbol{x}}}_0 - \dot{\boldsymbol{x}}_{max} \tag{8.4}$$

ergibt. Diese kann durch Einsetzen in die Relation

$$\sigma^2_{\dot{x},0} \simeq \frac{\epsilon^2_{\dot{x},max}}{10} \tag{8.5}$$

zur Abschätzung des Startwertes für die Varianz der Geschwindigkeit herangezogen werden. Für die Ermittlung der Varianz der Beschleunigung kann identisch verfahren werden.

8.4.5 Filterung der Daten und Ableitung der Azimute

Nach der Erzeugung der Datenobjekte stehen alle für die Filterung notwendigen Daten interpoliert und in einer gemeinsamen Zeitskala zur Verfügung. Da in den Kapiteln 3.4.1 und 3.5.3 bereits ausführlich auf den algorithmischen Teil von Filterung und Glättung eingegangen wurde, soll an dieser Stelle lediglich eine kurze Beschreibung der Abläufe erfolgen.

Die Aufgabe der Kalman-Filterung besteht in erster Linie darin, die Erfassungszeitpunkte aller Scannerprofile aus den Positionsinformationen der GPS-Messungen abzuleiten. Da an den Punkten der Profilmessungen keine Beobachtungen verfügbar sind, wird der Systemzustand im Sinne der Kalman-Filterung an diesen Stellen lediglich durch Prädiktion (3.24) fortgeschrieben, ohne den Zustandsvektor durch Messungen aufzudatieren. Der ausgeglichene Zustandsvektor ist für diese Epochen identisch mit dem prädizierten. Erst in der nächstfolgenden Epoche mit GPS-Beobachtungen kann wieder eine Aufdatierung und somit Einbeziehung von Messwerten stattfinden, was zu den aus Abbildung 8.11 ersichtlichen sprunghaften Änderungen der prädizierten Trajektorie führt.

Die Fortschreibung eines nachfolgenden Systemzustandes ohne Messungen ist unkritisch, solange zwischen zwei GPS-Messungen keine abrupte Änderung der Beschleunigungswerte stattfinden, durch die sich das Systemverhalten von den gemessenen Zuständen entfernt. In diesem Fall würde die Innovation (3.29), also die Differenz zwischen prädizierten und gemessenen Beobachtungen, anwachsen und möglicherweise zu einer Verletzung der Nullhypothese des Globaltests führen. Ein solches Verhalten ist jedoch als allgemeines Problem einer Filterung anzusehen und kann durch langsamere Geschwindigkeiten oder hohe Abtastraten vermieden werden.

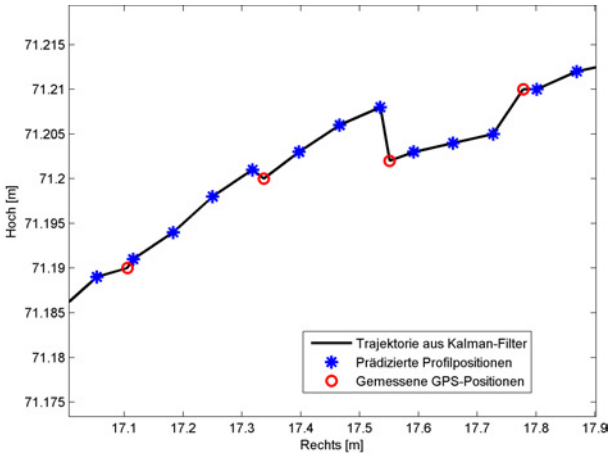


Abbildung 8.11: Prädiktion der Profilpositionen

Im Anschluss an die Filterung der Trajektoriendaten und Schätzung der Positionen der Scanprofile kann zur Verbesserung der Schätzwerte aller Epochen eine optionale Rückwärtsfilterung vorgenommen werden Schrick (1977). Die Vereinigung der im Hin- und Rückweg ermittelten Zustandsvektoren kann Kapitel 3.5.2 entnommen werden. Entscheidend ist hierbei, dass die letzte Epoche der Vorwärtsfilterung mit ihrer VKM die Startwerte $\boldsymbol{y}_0$ und $\boldsymbol{\Sigma}_{yy,0}$ für die Filterung im Rückweg bilden. Zudem sind für die Zusammenführung zu einem einzigen Zustandsvektor $\boldsymbol{y}_{k,VR}$ mit seiner VKM $\boldsymbol{\Sigma}_{yy,VR}$ alle ausgeglichenen Zustandsvektoren und ihre VKM zu speichern.

Alternativ zur Glättung mit Hilfe der Kombination von vorwärts und rückwärts gefilterter Trajektorie kann eine Glättung durch den Rauch-Tung-Striebel-Algorithmus durchgeführt werden. Für die Filterung des Hinweges werden die durch Kalman-Filterung bestimmten Zustandsvektoren verwendet. Im Rückweg hingegen erfolgt eine Formulierung des Kalman-Filter-Algorithmus als Informationsfilter, bei dem der ausgeglichene Zustand und seine VKM mit Hilfe der Inversen von $\boldsymbol{Q}_{ll,k}$ und $\boldsymbol{\Sigma}_{\bar{x}\bar{x},k}$ aufdatiert werden (Haykin, 2001). Der in diesem System verwendete RTS-Algorithmus liefert hierbei eine deutlich glattere Trajektorie im Vergleich zur Kombination aus Vorwärts- und Rückwärts-Kalman-Filterung.

Als letzter Prozessierungsschritt vor der abschließenden Transformation der Profile sind die horizontalen Raumwinkel des Fahrzeuges - hier als Azimut bezeichnet - zu berechnen. Wie bereits in Kapitel 3.7 beschrieben, existieren unter Verzicht auf eine kreiselgestützte Bestimmung in der Praxis eine Reihe von Lösungen. Da alle Positionsbestimmungen im langzeitstabilen WGS84-System durchgeführt wurden und in die Gauß-Krüger-Ebene überführt wurden, sind die horizontalen Geschwindigkeitsvektoren für die Ableitung des horizontalen Raumwinkels geeignet.

8.4.6 Erzeugung der Punktwolke

Nach erfolgreicher Azimutbestimmung liegt für jeden Zeitpunkt einer Profilmessung ein Vektor der Form

$$\boldsymbol{y}^{+}_{Scan} = \begin{bmatrix} Rechts_{GK} \\ Hoch_{GK} \\ Hoehe \\ \varphi_{GK} \\ \omega \\ \kappa \\ X_{Scanner} \\ Z_{Scanner} \\ Int_{Scanner} \end{bmatrix}, \quad mit \quad \begin{bmatrix} \text{Rechtswert} \\ \text{Hochwert} \\ \text{Höhe} \\ \text{Azimut} \\ \text{Nickwinkel} \\ \text{Rollwinkel} \\ \text{X-Koordinate} \\ \text{Z-Koordinate} \\ \text{Intensitätswert} \end{bmatrix} \tag{8.6}$$

vor. Ausgehend von diesen Daten kann jetzt eine Transformation der Punkte jedes einzelnen Profils von 2D-Profilkoordinaten in das Gauß-Krüger System erfolgen (Abbildung 8.12), die in drei Schritten abläuft:

1. Transformation der 2D-kartesischen in 2D-Polarkoordinaten
2. Anbringung der Kalibrierwerte für den Scanner
3. Polares Anhängen eines Scanpunktes

Aus Gründen der Verarbeitungsgeschwindigkeit werden die ermittelten Kalibrierwerte für den Scanner erst in diesem Schritt berücksichtigt, zumal es bisher nur um die Positionsbestimmung für den Zeitpunkt eines Profil-Nulldurchgangs ging. Da die Koordinaten bereits in polarer Form vorliegen, können hierbei die von Tachymetern bekannten Rechenregeln zur Korrektion polarer Messelemente angewendet werden.

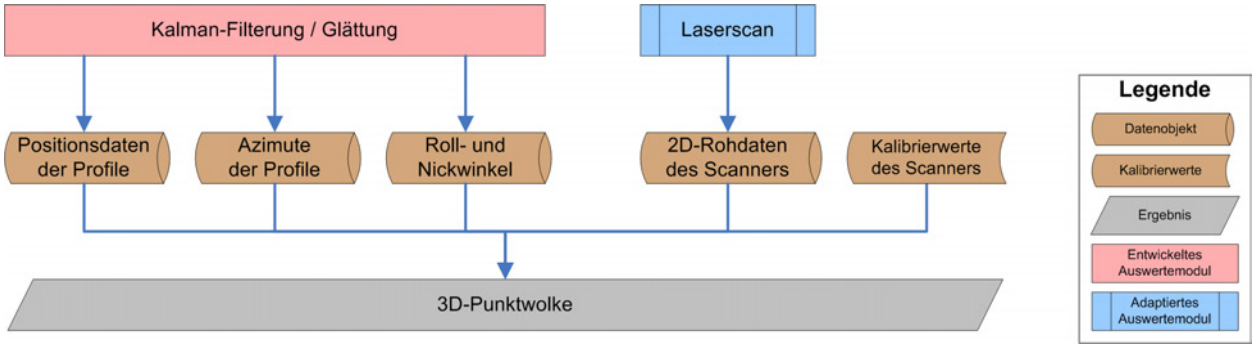


Abbildung 8.12: Transformation der Profile in Objektraum

Für jeden Scanpunkt werden zunächst die kartesischen Koordinaten durch lineare Interpolation zwischen den Nulldurchgängen zweier Profilmessungen berechnet, deren Positionen aus der Filterung bekannt sind. Vereinfachend wird hierzu die Annahme getroffen, dass die Rotationsgeschwindigkeit des High-Speed-Motors zwischen zwei Profilen konstant ist. Dann erfolgt die eigentliche Überführung der zweidimensionalen Scannermessungen in den dreidimensionalen Objektraum durch Transformation in das übergeordnete Koordinatensystem. Hierbei werden die aktuellen Drehwinkel des Scanner-Koordinatensystems gegenüber dem übergeordneten System berücksichtigt. Dieser Schritt beansprucht aufgrund der sehr hohen Punktanzahl den größten Teil der Prozessierungszeit.

Als Endergebnis dieser Auswertung liegt nun die vollständig entzerrte und um die Bewegung des Fahrzeuges korrigierte dreidimensionale Punktwolke im ASCII-Format vor. Diese kann von professionellen Modellierungslösungen wie LFM-Modeller, Cyclone oder RealWorks Survey importiert werden, um eine anschließende Modellierung der erfassten Objekte vorzunehmen.

9 Validierung des Systems

9.1 Rahmen und Umfang der Validierung

Die Validierung eines Prototyps unter praxisnahen Bedingungen ist elementarer Bestandteil einer jeden Systementwicklung. Neben verschiedenen Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit einzelner Systemkomponenten soll im folgenden Kapitel auch die Genauigkeit des Gesamtsystems durch Messungen an realen Objekten untersucht und beurteilt werden.

Im Hinblick auf die Beurteilung von Messsystemen ist grundsätzlich zwischen innerer und äußerer Genauigkeit zu unterscheiden, die auch in diesem System betrachtet werden sollen. Als innere Genauigkeit ist hierbei die Präzision des Systems, also die Abweichung der Messergebnisse unter Wiederholbedingungen zu verstehen (DIN, 2002). Sie wird häufig auch als relative Genauigkeit bezeichnet und kann durch die wiederholte Aufnahme eines Objektes mit anschließendem Koordinatenvergleich bestimmt werden. Demgegenüber liefert die äußere Genauigkeit Angaben über die Annäherung der Messergebnisse an den wahren Wert, der durch ein übergeordnetes Prüfnormal zu realisieren ist. Die äußere Genauigkeit ist im Vergleich mit der inneren als absolute Angabe zu verstehen und kann durch die Erfassung gescannter Objekte mit unabhängigen Messverfahren ermittelt werden, die aufgrund höherer Genauigkeiten als Referenzlösung betrachtet werden können.

Im Gegensatz zu skalaren Messgrößen wie der Streckenmessung bei Tachymetern besitzt die innere Genauigkeit bei kinematischen Messsystemen einen großen Einfluss auf die nachbarschaftlichen Zusammenhänge der erfassten Punktwolke. Die Gewährleistung hoher Nachbarschaftsgenauigkeiten ist für viele Anwendungen des entwickelten Systems von vorrangiger Bedeutung. So sind bei Visualisierungen ausgedehnter Objekte lokale Verzerrungen in der Punktwolke äußerst störend und weniger zu tolerieren als absolute Abweichungen gleicher Größenordnung, die auf die gesamte Punktwolke wirken.

Zur empirischen Validierung der inneren und äußeren Genauigkeit wurden unterschiedliche Testumgebungen genutzt. Da das entwickelte System vornehmlich auf den Einsatz im Straßenraum ausgerichtet ist, sollten die Systemtests vornehmlich auf glatten Fahrbahnoberflächen mit geringen Unstetigkeiten ausgeführt werden. Um eine Beeinträchtigung des fließenden Verkehrs zu vermeiden, wurden die Testmessungen auf folgenden Arealen durchgeführt:

1. „Welfenschloss“, heutiges Hauptgebäude der Leibniz Universität Hannover (Abbildung 9.22)
2. „Zentrum für Hochschulsport“ (ZfH) der Leibniz Universität Hannover (Abbildung 9.36)

Beide Areale sind für den öffentlichen Verkehr unzugänglich, so dass eine größere Anzahl unabhängiger Objektaufnahmen unter verschiedenen Bedingungen, insbesondere im Hinblick auf die Abschattung von GPS-Signalen, durchgeführt werden konnten. Eine Beschreibung der speziellen Charakteristika der beiden Testumgebungen kann Tabelle 9.1 entnommen werden.

Neben der empirischen Prüfung des Gesamtsystems soll im folgenden Kapitel auch eine Prüfung und Bewertung einzelner Systembestandteile vorgenommen werden, auf deren Grundlage die Qualität kritischer Komponenten und ihre Auswirkung auf die Genauigkeit des Messsystems beurteilt werden kann. In diesem Zusammenhang werden sowohl die Qualität der Sensordaten als auch die unterschiedlichen Verfahren zur Filterung und Glättung der Trajektorie sowie zur Azimutbestimmung untersucht.

Diese Untersuchungen wurden entweder im Labor durchgeführt oder mit Hilfe von Daten umgesetzt, die im Rahmen der oben genannten Testmessungen in realen Umgebungen erhoben wurden. Zudem konnten die Ergebnisse verschiedener Genauigkeitsuntersuchungen genutzt werden, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Physikalische Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt umgesetzt wurden.

9.2 Qualität der Sensordaten

9.2.1 Standardabweichung der GPS-Positionen

Die mit Hilfe eines oder mehrerer GPS-Empfänger beobachteten Positionsdaten tragen entscheidend zur räumlichen Referenzierung der gescannten Objektpunkte bei, wodurch die Qualität dieser Daten für das gesamte System von besonderer Bedeutung ist und im Folgenden betrachtet werden soll. Neben der Position im WGS84-System liefert die GPS-Auswertesoftware Trimble Total Control (TTC) darüber hinaus weitere Informationen zu jeder Epoche. Insbesondere die Standardabweichungen der Punkte, die

Testgebiet	**„Welfenschloss“**	**„Zentrum für Hochschulsport“**
Beschreibung	Offener Platz vor dem Hauptgebäude mit wechselnden Fahrbahnbelägen und GPS-Empfangsbedingungen sowie zahlreichen Gebäuden in unmittelbarer Nachbarschaft der Trajektorie	Rundkurs auf sehr ebener Fahrbahn mit zum Teil schwierigen Empfangsbedingungen und ausgedehnten Objekten (Sporthallen) mit einer großen Anzahl möglicher identischer Punkte
GPS-Empfang	Schlecht (4 SV[1]) bis gut (8 SV[1]), mit Abschattungen unter Bäumen und möglichen Mehrwegeeffekten entlang der Schlossfassade	Schlecht (4 SV[1]) bis gut (8 SV[1]), mit stärkeren Abschattungen im Kurvenbereich und zahlreichen Wechseln der Satellitenkonfiguration
Fahrbahnoberfläche	Fußweg und Asphaltstrecke mit Unebenheiten, überwiegend quergeneigte und doppelt gekrümmte Streckenteile	Tartanbahn, glatt und horizontal
Messungen Streckenlängen	17 60-440 m	6 160- 430 m

[1] SV: Space Vehicle / Satellit

Tabelle 9.1: Beschreibung der Testumgebungen

im Gegensatz zu den Koordinaten in kartesischer Form als s_{Ost}, s_{Nord} und $s_{Höhe}$ angegeben werden, können für die Aufstellung der VKM der Beobachtungen $\mathbf{\Sigma}_{ll,k+1}$ genutzt werden. Abbildung 9.1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen der Ost-Komponente in der Histogrammdarstellung. Hierbei ist der Unterschied des Genauigkeitsniveaus zwischen Einzelpositionen, die auf der Grundlage von Phasenauswertungen (Fixed-Lösungen) und aus reinen Codemessungen (Float-Lösungen) berechnet wurden, deutlich zu erkennen.

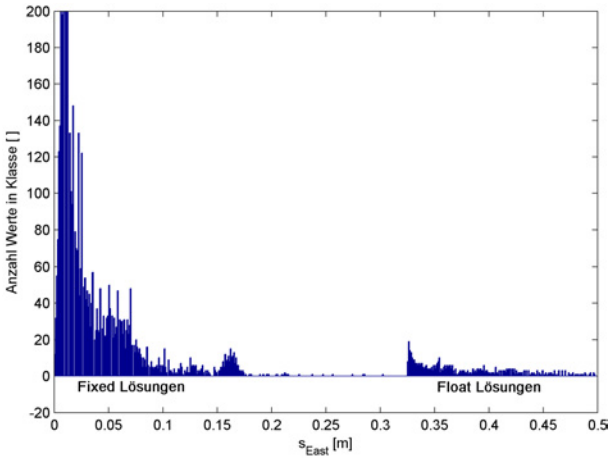


Abbildung 9.1: Histogramm der Standardabweichungen (East)

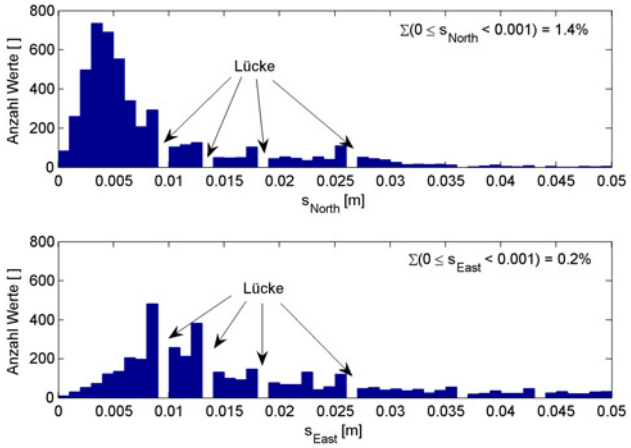


Abbildung 9.2: Vergleich von North- und East-Komponente

Problematisch wirkt sich in diesem Zusammenhang jedoch aus, dass die von TTC ausgegebenen Genauigkeiten vermutlich aufgrund der begrenzten Anzahl an Nachkommastellen gelegentlich als Nullwerte angegeben sind. So besitzen 1.4% von insgesamt 6132 Positionen in Nord- und 0.2% in Ost-Richtung eine Standardabweichung von weniger als 0.001 m (Abbildung 9.2). Dies kann unter Umständen zu einer singulären VKM der Innovation $\mathbf{\Sigma}_{dd,k}$ führen, wodurch eine Inversion dieser Matrix und somit eine Aufdatierung des Zustandsvektors nach Gleichung (3.33) nicht möglich ist.

Darüber hinaus ist auffällig, dass einige Klassen des Histogramms der Standardabweichung für alle drei Koordinatenrichtungen Ost, Nord und Höhe unbesetzt sind (Abbildung 9.2). Da diese Lücken nicht gleichabständig sind, können Rundungsungenauigkeiten ausgeschlossen werden. Da auch ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Standardabweichungen und dem PDOP-Wert oder der Anzahl der beobachteten Satelliten nicht nachweisbar ist, konnte ein Grund für diese Form der Histogrammverteilung nicht abschließend ermittelt werden.

9.2.2 Referenzierung der Scanprofile

Wie bereits ausführlich dargelegt, ist die Gleichabständigkeit von PPS-Pulsen und Profilzeitpunkten sowie die Anzahl der vorhandenen Ausreißer in diesen Daten von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Messergebnisse. Aus diesem Grund ist das vorliegende Datenmaterial auf Konsistenz sowie Äquidistanz der Signalzeitpunkte zu untersuchen. Da der Erfassungszeitpunkt eines Signals die eigentliche Messinformation darstellt, machen sich Datenlücken und Ausreißer ausschließlich in Form von Änderungen des zeitlichen Abstandes zwischen zwei Signalen bemerkbar.

Abbildung 9.3 zeigt den vom Echtzeitrechner erfassten zeitlichen Abstand der Signalintervalle des PPS-Pulses. Als zugrundeliegendes Zeitnormal dient hierbei die Uhr des Echtzeitrechners, so dass sich die bereits in Kapitel 7.6.1 angesprochene Drift als Vertikalversatz der Kurve bemerkbar macht. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass über einen Messzeitraum von 210 Sekunden weder Ausreißer noch Datenlücken für den PPS-Puls auftreten und sich die durch Systemlast bedingte Variation der Erfassungszeitpunkte in einer Bandbreite von 50 μs bewegt.

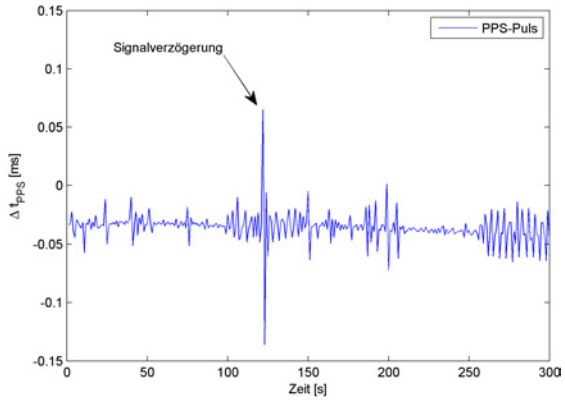


Abbildung 9.3: Äquidistanz des PPS-Pulses

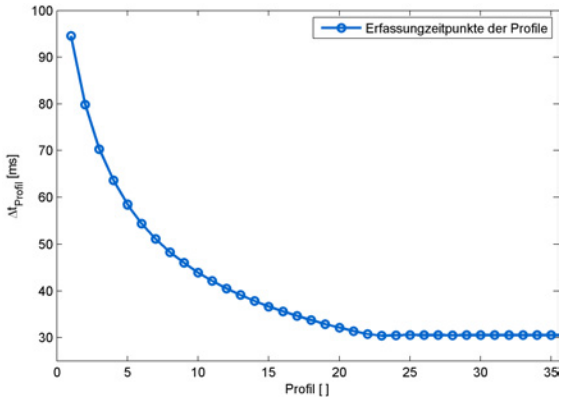


Abbildung 9.4: Anlaufverhalten des Scanners

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 9.4 die Änderung des Zeitintervalls für die vom Scanner erzeugten Rechteckimpulse der Einzelprofile bei 33 Hz Profilfrequenz. Hierbei ist deutlich sichtbar, dass der Scanner zu Beginn jeder Messung eine gewisse Anlaufzeit benötigt, bevor er die notwendige Profilfrequenz erreicht hat. In diesem Fall kann erst nach 25 Profilen davon ausgegangen werden, dass die Profile aus zeitlicher Sicht gleichabständig erfasst werden. Die Anlaufzeit des Scanners ist hierbei von der Profilfrequenz abhängig, die sich aus der Auflösung in Längsrichtung sowie der Fahrtgeschwindigkeit ergibt.

In den aufgezeichneten Daten der Profilsignale sind im Gegensatz zum PPS-Puls des GPS-Empfängers zahlreiche Lücken in Form von Verdopplungen des Signalintervalls und gelegentliche Signalverzögerungen zu erkennen (Abbildung 9.5). Die Ursache für diesen Effekt kann nicht abschließend geklärt werden, da keine Periodizität für das Auftreten von Lücken zu erkennen ist und somit eine Überbelastung des Systems durch Datentransfer (vergleiche Kapitel 7.6.2) als Ursache nicht in Frage kommt, weil eine Leerung des Datenpuffers aufgrund der kontinuierlichen Datenerfassung periodisch durchgeführt wird.

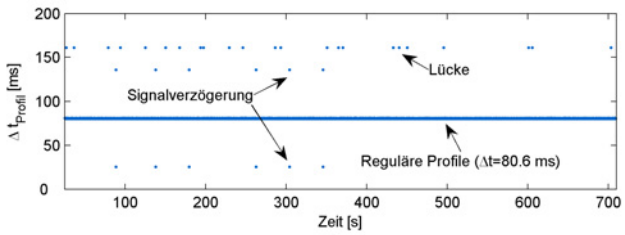


Abbildung 9.5: Profilabstände mit Datenlücken

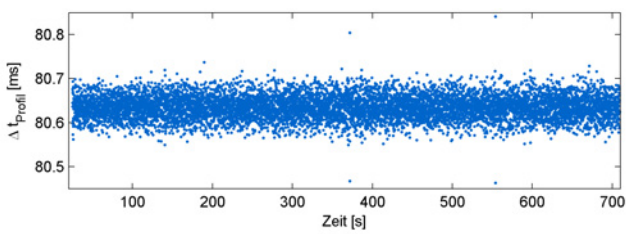


Abbildung 9.6: Profilabstände nach Bereinigung

Die vorhandenen Lücken und Signalverzögerungen werden nach dem Einlesen der Daten durch die Auswertesoftware RAMSYS PointCloud beseitigt, wie aus Abbildung 9.6 ersichtlich ist. Nach Elimination der Ausreißer bewegt sich die Variation der Erfassungszeitpunkte für die Scanprofile innerhalb einer Bandbreite von 100 μs.

9.2.3 Einfluss der Querbeschleunigung auf Inklinometermessungen

Der bereits in Kapitel 6.2.2 diskutierte Einfluss von Störbeschleunigungen, die orthogonal zur sensitiven Achse eines Inklinometers auf die Neigungsmesswerte wirken, kommt auch bei diesem Prototyp zum Tragen. Insbesondere bei schnellen Kurvenfahrten erzeugen Querbeschleunigungen scheinbare Neigungsänderungen, die im Objektraum zu systematischen Abweichungen innerhalb der Punktwolke führen.

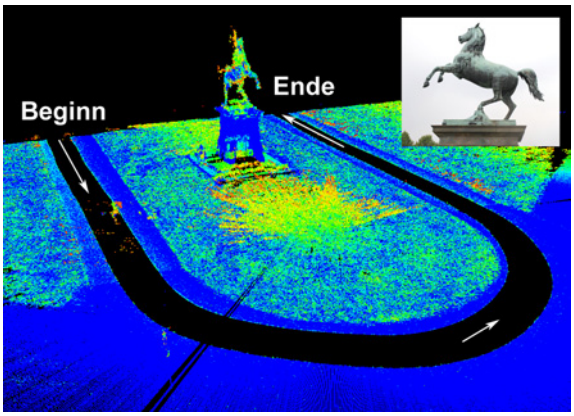


Abbildung 9.7: Niedersachsenpferd und befahrene Trajektorie

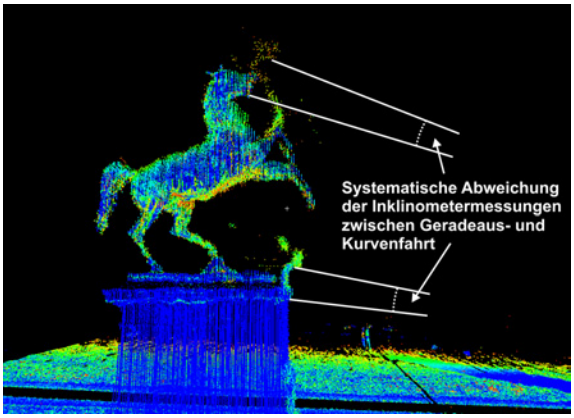


Abbildung 9.8: Systematische Abweichung der Inklinometermessung

Im Rahmen verschiedener Testmessungen wurde unter anderem das Niedersachsenpferd vor dem Hauptgebäude der Universität (Abbildung 9.7) auf einer U-förmigen Trajektorie von drei Seiten aus erfasst und in den Objektraum transformiert. Der kinematische Scan wurde von einem befestigten Weg aus entgegen dem Uhrzeigersinn durchgeführt, wobei die Geländeoberfläche auf allen drei Seiten eine zum Pferd hin ansteigende Querneigung besitzt.

Während die rechte und linke Seite des Pferdes, die jeweils aus geradlinigen Bewegungen erfasst wurden, keine sichtbaren Differenzen zueinander aufweisen, ist die aus der Kurvenbewegung heraus erfasste Vorderseite des Pferdes mit einer deutlichen vertikalen Abweichung behaftet (Abbildung 9.8). Da die mit GPS bestimmte Höheninformation über die gesamte Trajektorie mit geringen Variationen stetig verläuft und kein horizontaler Versatz in der Punktwolke vorliegt, muss der Grund dieser Abweichung in einer fehlerhaften Neigungsmessung vermutet werden. So ist anzunehmen, dass die während der Kurvenfahrt nach außen gerichtete Zentrifugalbeschleunigung vom Inklinometer als zusätzliche Neigungsänderung aufgefasst wurde, die zu einer Anhebung der zur Kurvenmitte hin gelegenen Profilpunkte führt. Dieser Effekt kann in der Regel nur durch die gleichzeitige Verwendung von Kreiselsensoren kompensiert werden.

Im Vorgriff auf die Ergebnisse von Kapitel 9.5 kann in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass Effekte dieser Art auch bei einer Bewegung des Wagens auf der ebenen 400 m-Laufbahn des Zentrums für Hochschulsport (Abbildung 9.36, Seite 143) zu beobachten sind. Abbildung 9.9 zeigt die Azimute der befahrenen Teststrecke zur Identifikation der Kurven- und Geradenabschnitte. So scheint die befahrene Bahnoberfläche in Kurven zur Außenseite hin geneigt zu sein, wohingegen die Querneigung auf den Geradenstücken deutlich geringer ist (Abbildung 9.10).

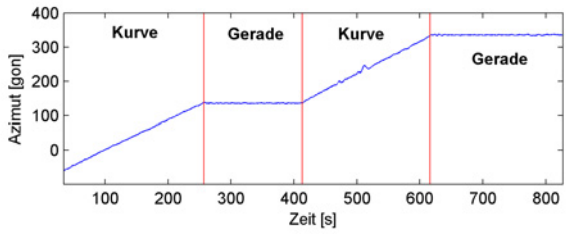


Abbildung 9.9: Azimute der Teststrecke

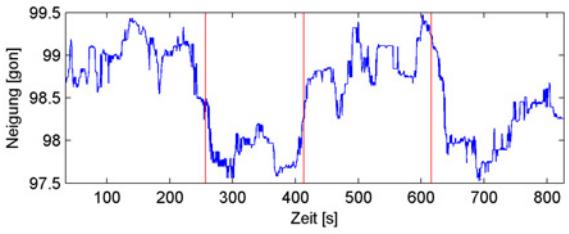


Abbildung 9.10: Neigungswerte der Teststrecke

Die auch auf den Geraden vorhandenen Restabweichungen zur Horizontalen sind vermutlich auf eine ungleiche Gewichtsverteilung auf dem Wagen und weniger auf bautechnische Abweichungen der Laufbahn zurückzuführen.

9.3 Verfahren zur Filterung und Glättung der Trajektorie

9.3.1 Stärken und Schwächen der Filter- und Glättungsalgorithmen

Die Filterung und Glättung der durch GPS-Beobachtungen erfassten Fahrzeugtrajektorie mit Hilfe eines RTS-Algorithmus (Kapitel 3.5.3) oder eines Vorwärts-Rückwärts-Kalmanfilters (Kapitel 3.5.2) ist essentieller Bestandteil der beschriebenen Systementwicklung. Hierbei ist neben der bestmöglichen Annäherung der geglätteten Trajektorie an die mit zufälligen und systematischen Abweichungen behafteten Messwerte vor allem die Homogenität der Punktwolke zu gewährleisten.

Unter der Voraussetzung, dass die Trägerplattform und somit auch der Laserscanner eine gleichförmig beschleunigte Bewegung vollziehen, kann die Homogenität der Punktwolke vor allem durch eine möglichst glatte Trajektorie gewährleistet werden. In diesem Zusammenhang sind jedoch zwei wesentliche Probleme zu beachten, die häufig bei mobilen Messsystemen auftreten und einer realitätsgetreuen und homogenen Punktwolke entgegenstehen:

- Beobachtungen, die von systematischen Effekten und Unstetigkeiten überlagert sind
- Reale Eigenbewegungen des Fahrzeuges, die aufgrund einer begrenzten Sensordynamik mit systematischen Effekten überlagert sind oder durch zu starke Glättung der Trajektorie „verschmieren“

Während die mit Abweichungen behafteten Beobachtungen in der Regel nicht vorhandene Pseudobewegungen des Fahrzeuges vorspiegeln, die sich jedoch nicht in Form einer Abstandsänderung zum Objekt in den Daten des Scanners wiederfinden, induzieren unvollständig erfasste Fahrzeugbewegungen einen gegenteiligen Effekt innerhalb der Punktwolke. Das Problem bei der Wahl eines angemessenen Glättungsgrades besteht darin, einen Ausgleich zwischen der Elimination stochastischer Bewegungen des Rovers sowie unzureichend kompensierter systematischer Effekte auf der einen Seite und der vollständigen Repräsentation der realen Fahrzeugbewegung auf der anderen Seite zu finden.

Die Auswirkung der angesprochenen Probleme auf die vorliegende Aufgabenstellung soll anhand der Glättung einer mit systematischen Abweichungen behafteten GPS-Trajektorie (Kapitel 9.3.2) und der durch äußere Erregerfrequenzen herbeigeführten Oszillation des Fahrzeuges um seine Längsachse (Kapitel 9.3.3) diskutiert werden.

9.3.2 Einfluss des GPS-Empfangs

Die bei der Positionierung mit GNSS-Verfahren auftretenden Abweichungen sind insbesondere bei kinematischen Anwendungen zu beachten, da hierbei in aller Regel Einzelpunktpositionen für jede Epoche berechnet werden und somit keine Mittelbildung der Messwerte über einen längeren Zeitraum möglich ist. Während der überwiegende Teil der systematisch wirkenden Einflussgrößen durch die Beobachtung der beiden Frequenzen L1 und L2 sowie durch relative Positionierungsverfahren wie SAPOS weitgehend ausgeschaltet werden kann, lassen sich die Auswirkungen verschiedener stationsabhängiger Effekte nicht vermindern.

Hierzu zählen unter anderem Mehrwegeffekte durch Signalreflexion an Gebäuden, Änderungen in der zur Positionsbestimmung verwendeten Satellitenkonfiguration sowie Signalabschattungen durch Bäume und Gebäude. Abbildung 9.11 zeigt die Auswirkungen, die durch Hinzunahme eines zusätzlichen Satelliten zur Positionsbestimmung entstehen, der in das Gesichtsfeld von zwei unabhängigen GPS-Empfängern mit einer Mindestelevation von 10° eintritt. Die dargestellte Trajektorie entspricht den bereits vollständig ausgewerteten und durch den RTS-Algorithmus geglätteten Filterdaten.

Obwohl die geometrische Konfiguration durch die Hinzunahme eines zusätzlichen Satelliten grundsätzlich verbessert wird, was auch an der gleichzeitigen Verringerung des PDOP zu erkennen ist, entsteht ein signifikanter Sprung in der beobachteten Trajektorie, der nicht durch Fahrzeugbewegungen verursacht wird (Abbildung 9.12). Wie aus dem Vergleich der beiden Abbildungen hervorgeht, besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Wechsel von fünf auf sechs Satelliten bei GPS-Sekunde 409399, der sich auch in den Beobachtungen des zweiten, nach hinten versetzten, GPS-Empfängers in einem Abstand von zwei Sekunden zeigt. Die hohen PDOP-Werte sind durch eine vergleichsweise starke Abschattung der Satellitensignale bedingt, da sich der dargestellte Trajektorienabschnitt direkt unter einer größeren Baumgruppe befindet.

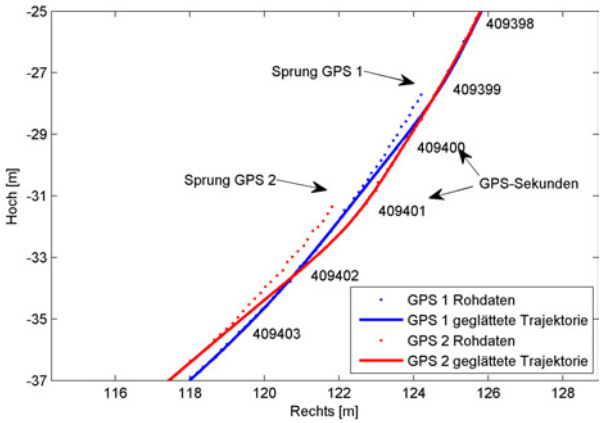


Abbildung 9.11: Versatz in den GPS-Beobachtungen

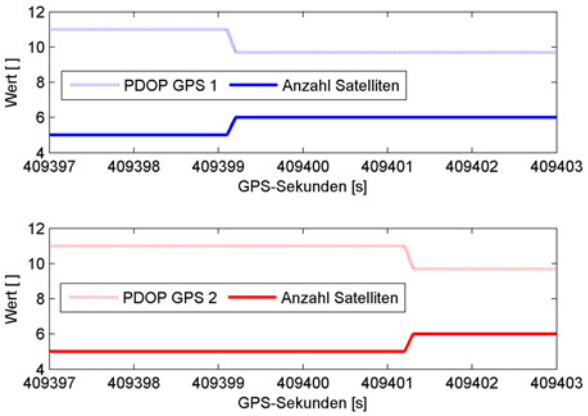


Abbildung 9.12: Satellitenkonfiguration

Die beiden GPS-Empfänger sind entsprechend der in Abbildung 6.5 auf Seite 76 dargestellten Konfiguration in Fahrtrichtung hintereinander angeordnet, so dass die von ihnen erfassten Trajektorien weitgehend deckungsgleich sein sollten. Eine solche Überdeckung ist auch bis zur Sprungstelle erkennbar, jedoch führt die angesprochene Konfigurationsänderung im weiteren Verlauf der Messung zu systematischen Abweichungen in Form eines Lateralversatzes zwischen beiden Empfängerpositionen.

Der in der Ebene erkennbare Versatz spiegelt sich mit größerer Amplitude auch in der ellipsoidischen Höhe beider Empfänger wieder, die exemplarisch für den ersten Empfänger (GPS 1) in Abbildung 9.13 dargestellt ist. Die Beobachtung des Höhenversatzes kann beim Einsatz des Systems auf ebener Strecke dazu verwendet werden, fehlerhafte Positionsbestimmungen eines oder mehrerer GPS-Empfänger zu detektieren. Bei der in diesem Fall verwendeten Konfiguration mit zwei unabhängigen Empfängern sind darüber hinaus der Raumvektor sowie seine horizontale Projektion dazu geeignet, systematische Abweichungen durch fehlerhafte Positionslösungen aufzudecken. Der horizontale Abstand zwischen beiden Antennen ist zusammen mit der aus Kalibrierungsmessungen (Kapitel 7.5.1) ermittelten Sollentfernung in Abbildung 9.14 zu sehen. Auch hier sind deutliche Abweichungen zur Solldistanz von 605.5 mm am Ende der Trajektorie sowie der vorangehende Versatz klar zu erkennen.

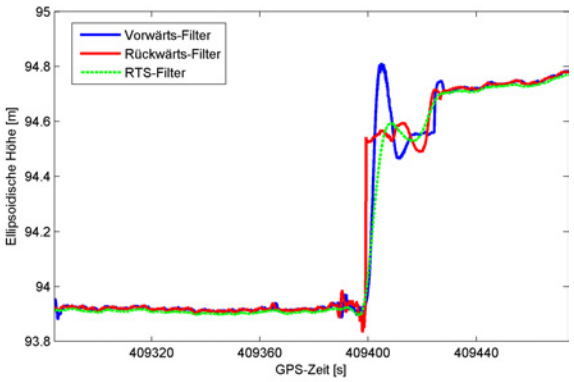


Abbildung 9.13: Höhenversatz in den GPS-Beobachtungen

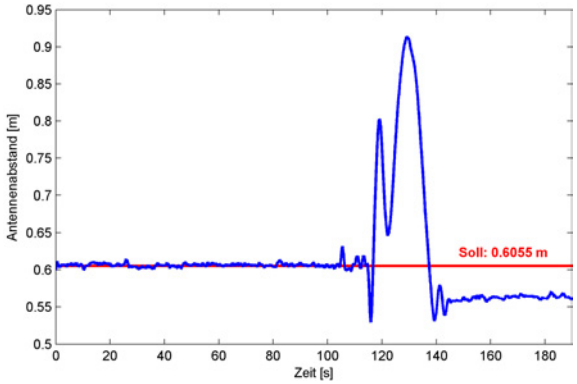


Abbildung 9.14: Antennenabstand zwischen Rover 1 und Rover 2

Während die Positionsdifferenzen zwischen beiden Trajektorien durch Filter- und Glättungsverfahren gemildert werden können, wiegen die Abweichungen des Azimutes, die sich bei der Berechnung aus relativen DGPS-Beobachtungen ergeben, deutlich schwerer. So bewirkt ein Versatz in einer Größenordnung von 0.3 m bei einer Basis von 0.6 m eine Azimutabweichung von annähernd 30 gon, was einer Verzerrung der Punktwolke im Objektraum von bis zu 9 m entspricht. Aus diesem Grund ist es notwendig, systematische Effekte vor einer Transformation der Scanprofile in den Objektraum zu detektieren.

Im Hinblick auf die Auswertung derartig beeinflusster GPS-Beobachtungen kann keine allgemeingültige Herangehensweise formuliert werden, da die zugrunde liegenden Einflüsse vielfach weder exakt bestimmt noch modelliert werden können. Verschiedene aus den Filterergebnissen ableitbare Parameter wie der Antennenabstand können jedoch als Schwellwertindikator für vorliegende systematische Abweichungen genutzt werden, um eine fehlerhafte Generierung der Punktwolke zu verhindern.

9.3.3 Einfluss von Fahrzeugbewegungen

Neben systematischen Abweichungen in der Trajektorienbestimmung, die durch das verwendete Messverfahren begründet sind, müssen in mobilen Systemen auch physikalische Effekte berücksichtigt werden, die aufgrund von Eigenbewegungen des Fahrzeuges in der Punktwolke enthalten sind. Diese Notwendigkeit erwächst aus dem Prinzip der indirekten Bestimmung von Azimut und Nickwinkel aus GPS-Messungen und stellt einen wesentlichen Unterschied zu IMU-basierten Systemen dar.

Hierzu zählen insbesondere Drehungen des Fahrzeuges um seine Längs- und Querachse, die sogenannten Nick- und Rollbewegungen. Sie müssen auf der einen Seite für die Transformation der auf den Scanner bezogenen Objektpunkte mit Hilfe von Inklinometermessungen erfasst und auf der anderen Seite vor einer Filterung und Glättung der Fahrzeugtrajektorie rechnerisch eliminiert werden, da für die Bewegung des auf der Hinterachse gelagerten Fahrzeugsystems im Rahmen einer Filterung nur differentielle Translationen quer zur Fahrtrichtung zugelassen werden.

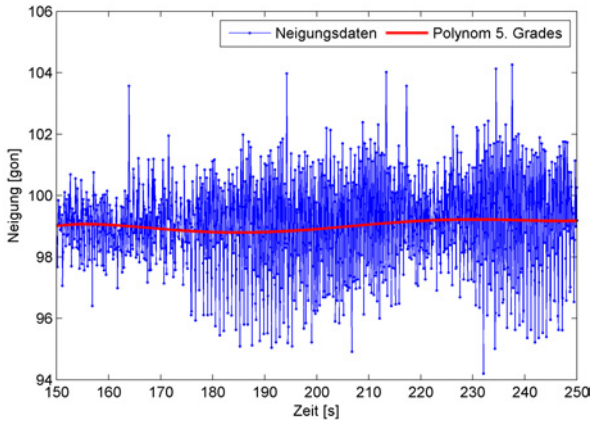


Abbildung 9.15: Neigungsdaten des Inklinometers

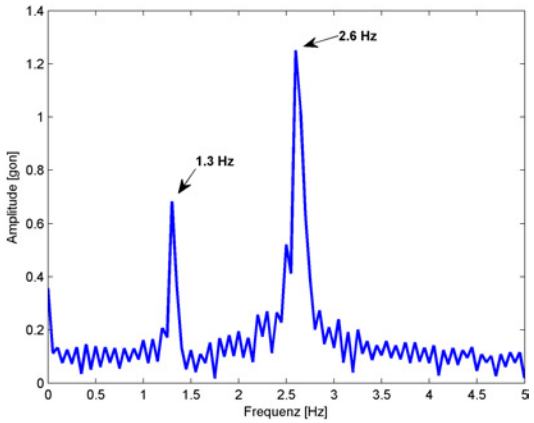


Abbildung 9.16: Amplitudenspektrum der Inklinometerdaten

Abbildung 9.15 zeigt die durch das Inklinometer ermittelten Rollwinkel des Fahrzeugs während einer Geradeausfahrt auf ebener Strecke über einen Zeitraum von 100 s, bei der eine deutliche Variation der Amplituden in Abhängigkeit von der Fahrtgeschwindigkeit zu erkennen ist.

Zur Ermittlung eventuell auftretender periodischer Bewegungen der Plattform wurden die in Abbildung 9.15 dargestellten Daten durch ein Polynom 5. Grades von systematischen Effekten befreit und in den Frequenzraum transformiert (Abbildung 9.16). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Rollbewegung des Fahrzeuges im Wesentlichen durch zwei Frequenzen von 1.3 Hz und 2.6 Hz gebildet wird. Diese entsprechen den Schrittfrequenzen, die durch manuelle Bewegung der Plattform auf den Wagen übertragen werden, wobei die Frequenz von 1.3 Hz durch den ungleichmäßigen Krafteinsatz beider Beine und eine somit vorhandene Oberschwingung der Schrittfrequenz erklärt werden kann.

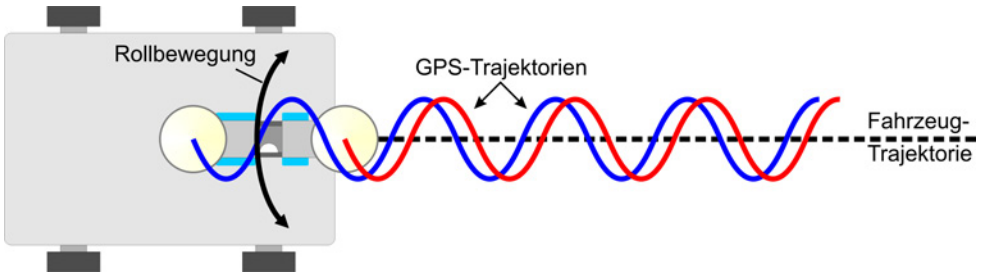


Abbildung 9.17: Auswirkung der Rollbewegung auf die Trajektorienbestimmung

Die Auswirkung einer unzureichend kompensierten periodischen Rollbewegung des Fahrzeuges auf die Positions- und Azimutbestimmung wird in Abbildung 9.17 verdeutlicht. Bei einer unzureichenden Reduktion der GPS-Beobachtungen auf den Ursprung des Fahrzeugsystems werden die verbleibenden horizontalen Querabweichungen vom Filter äquivalent zu realen Fahrzeugbewegungen behandelt. Aus diesem Grund sind die geglätteten Fahrzeugpositionen von der durch Rollbewegungen induzierten Abweichung beeinflusst, so dass im Falle der Azimutberechnung mit einem Empfänger die resultierenden Azimute

von Schwingungen gleicher Frequenz mit einer Phasenverschiebung von 90° überlagert sind. Dieser Effekt kann auf messtechnischer Basis durch eine Ableitung der Azimute aus relativen DGPS-Beobachtungen vermieden werden, da hierbei beide Antennen in gleicher Weise von einem solchen Effekt beeinflusst werden.

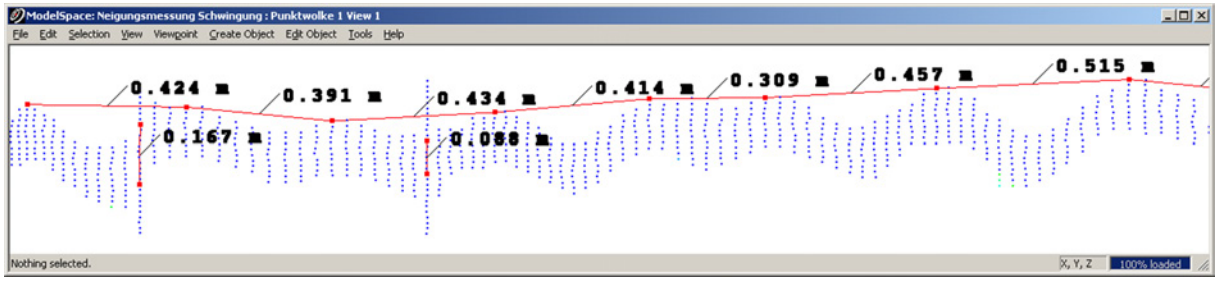


Abbildung 9.18: Auswirkung der Fahrzeugoszillation im Objektraum

Zur Veranschaulichung der Auswirkungen einer unvollständig korrigierten Rollbewegung im Objektraum wurde eine längliche Objektkante in einer Entfernung von 25 m durch eine lineare Scanbewegung erfasst (Abbildung 9.18). Die dominierende Schrittfrequenz von 2.6 Hz führt bei einer Geschwindigkeit der Plattform zwischen 1.1 m/s und 1.2 m/s rechnerisch zu einer longitudinalen Periodizität innerhalb der Punktwolke von 0.46 m. Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, konnten die Rollwinkel des Fahrzeuges nicht vollständig durch Inklinometermessungen erfasst werden, so dass eine Restsystematik mit einer Amplitude zwischen 0.09 m und 0.16 m, entsprechend 0.23 gon bis 0.43 gon, in der Punktwolke zu erkennen ist.

Als Gründe für diesen Effekt können der Dynamikbereich sowie die Reaktionszeit des verwendeten Neigungsmessers vermutet werden, die dazu führen, dass auftretende Neigungen mit Frequenzen von mehr als 0.5 Hz nicht oder mit Verzögerungen von bis zu 0.3 s aufgezeichnet werden. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass der vom Hersteller angegebene Frequenzgang von 0.5 Hz auf große Neigungsänderungen bezogen ist, die in diese Fall nicht vorliegen, so dass dieser Wert relativiert werden muss.

Abhilfe kann zum einen durch die Wahl eines Inklinometers mit optimiertem Frequenzgang oder durch zwei Neigungsmesser mit unterschiedlichen Frequenzgängen geschaffen werden. Zu diesem Thema sei auch auf Möhlenbrink (1984) verwiesen. Darüber hinaus sollte der verwendete Wagen aufgrund des vergleichsweise geringen Eigengewichtes von 200 kg in der vorliegenden Sensorkonfiguration stabilisiert werden. Die kann durch den Einsatz des Systems auf Kfz-gestützten Plattformen erreicht werden, auf denen bedingt durch die höhere Massenträgheit deutlich niederfrequentere Rollbewegungen zu erwarten sind.

9.3.4 Vergleich der Glättungsverfahren

Im Rahmen der Evaluierung des Gesamtsystems sollen im Folgenden auch die bereits in den Kapiteln 3.5.2 und 3.5.3 vorgestellten Algorithmen zur Glättung der Trajektorie in Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht werden. Ausgehend von der Aufgabe, eine abgefahrene Trajektorie möglichst exakt anhand der beobachteten GPS-Positionen zu rekonstruieren und zu glätten, ergeben sich zwei wesentliche Anforderungen an die Algorithmen:

1. Hinreichend gute Glättung der Trajektorie und dadurch auch insbesondere des Azimutes, um homogene Punktwolken mit hoher lokaler Formtreue zu erhalten
2. Fähigkeit der Algorithmen zur Berücksichtigung von Beschleunigungsänderungen bei Kurvenfahrten, um Übersteuerungseffekte (Abbildung 9.21) in den Extrempunkten der Kurven zu vermeiden

Beide Anforderungen werden in der Regel über das stochastische Modell der Kalman-Filterung gesteuert, da die VKM der ausgeglichenen Zustandsvektoren sowohl in die Glättung mit dem Vorwärts-Rückwärts-Kalmanfilter als auch mit dem RTS-Algorithmus eingehen. In diesem Zusammenhang ist die entgegengesetzte Wirkungsweise der Störbeschleunigungen auf die formulierten Anforderungen zu beachten. So kann auf der einen Seite eine hohe Annäherung an die GPS-Beobachtungen erreicht werden, was auf der andere Seite jedoch gleichzeitig eine starke Glättung der Trajektorie ausschließt.

Zur Lösung dieses Problems sind mehrere Ansätze denkbar. Zum einen kann bereits bei der Erfassung der Objektpunkte auf große Drehraten des Fahrzeugazimutes verzichtet werden, die gleichbedeutend mit engen Kurvenradien bei erhöhten Geschwindigkeiten sind. Zum anderen wäre die adaptive Steuerung der zulässigen Störbeschleunigungen während der Kalman-Filterung denkbar, bei der eine Anpassung der Störbeschleunigungen an fahrdynamische Randbedingungen erfolgt. Hierdurch ließe sich eine starke Glättung der Trajektorie auf Streckenabschnitten mit hoher Geschwindigkeit und somit weiter entfernten GPS-Positionen erreichen, wohingegen bei geringeren Fahrtgeschwindigkeiten, die für enge Kurvenfahrten notwendig sind, höhere Störbeschleunigungen zugelassen werden.

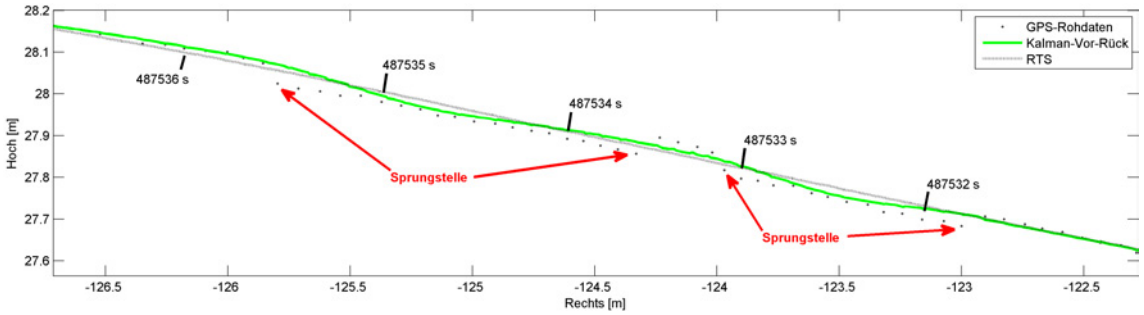


Abbildung 9.19: Filterverhalten bei Unstetigkeiten

Unabhängig von der Wahl des stochastischen Modells sollen im Folgenden die Unterschiede zwischen den bereits genannten Glättungsansätzen anhand verschiedener realer Messdaten diskutiert werden. Die bei der kinematischen Einzelpunktpositionierung mit GPS anzutreffenden systematischen Versätze entlang der Trajektorie, hier Sprungstellen genannt, sind in aller Regel schwer von unbeeinflussten Messwerten zu unterschieden. Abbildung 9.19 zeigt eine mit Sprungstellen überlagerte Trajektorie, die entlang einer Hausfassade mit einer Erfassungrichtung von rechts nach links bestimmt wurde.

In diesen Daten sind deutlich zwei Querversätze zu erkennen, die bei der Glättung mit Hilfe des Vorwärts-Rückwärts-Filters zu Abweichungen der Trajektorie führen, die nicht nur auf die Positionen sondern auch auf das abgeleitete Azimut wirken. Demgegenüber wird die vom RTS-Algorithmus geglättete Trajektorie deutlich weniger von den vorhandenen Sprungstellen beeinflusst, was sich auch in den Standardabweichungen von Rechts- und Hochwert der gefilterten GPS-Positionen zeigt (Abbildung 9.20). Hierbei sind die erhöhten Standardabweichungen der Vorwärts-Rückwärts-gefilterten Trajektorienpunkte klar zu erkennen, die aus den Abweichungen zu den GPS-Beobachtungen resultieren.

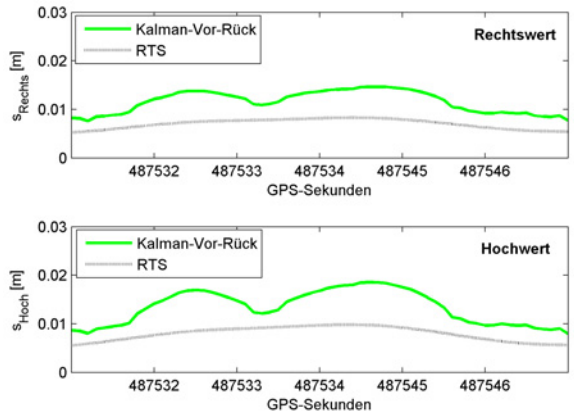


Abbildung 9.20: Standardabweichung der Rechts- und Hochwerte

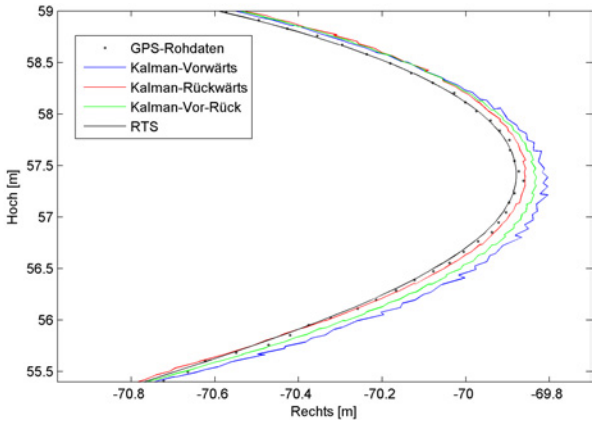


Abbildung 9.21: Vergleich der Filterverfahren bei Kurvenfahrt

Es ist jedoch anzumerken, dass Sprungstellen von größerer räumlicher Ausdehnung von keinem Glättungsalgorithmus kompensiert werden können, zumal die Unterscheidung zwischen beeinflussten und unbeeinflussten Abschnitten nur schwer möglich ist.

Wie bereits angesprochen, sind Kurvenfahrten mit kleinen Radien, wie in Abbildung 9.21 gezeigt, eines der zentralen Probleme bei der Trajektorienbestimmung durch Glättungsalgorithmen. Der dargestelle Abschnitt gehört zu einer S-förmigen Kurve, die von rechts unten nach links oben durchfahren wurde und zu erhöhten radialen Abweichungen in den einzelnen Filterschritten von bis zu 0.1 m führt.

Im Gegensatz zum Beispiel aus Abbildung 9.19 werden die mit GPS bestimmten Positionen hierbei deutlich besser durch den RTS-Algorithmus approximiert. Dennoch ist auch hier eine leichte Ausrundung der Kurve zur Mitte hin zu erkennen. Dieser Effekt ist auf algorithmischer Ebene dadurch zu erklären, dass die Standardabweichungen der Punkte in Abschnitten mit kleinen Krümmungsradien maximal werden, da die auftretenden Richtungsänderungen nicht durch die zulässigen Störbeschleunigungen aufgefangen werden können. Im Rahmen der Glättung erhalten Punkte mit großen Standardabweichungen eine entsprechend verringerte Gewichtung, wodurch sie bei der Berechnung der geglätteten Trajektorie weniger starke Berücksichtigung finden.

Ausgehend von den präsentierten Beispielen stellt der RTS-Algorithmus das leistungsfähigste Glättungsverfahren zur Trajektorienbestimmung dar, der vergleichsweise glatte Trajektorien bei geringen translatorischen Abweichungen von der Solltrajektorie gewährleistet. Die geringeren Standardabweichungen der RTS-geglätteten Positionen führen über die Geschwindigkeitsvektoren zu glatteren Azimuten und somit zu lokal stetigen Punktwolken.

9.4 Verfahren zur Azimutbestimmung

9.4.1 Vergleich von Inertialmesssystem und Ableitung aus Kalman-Filter

Die Bestimmung des Azimutes stellt - wie bereits ausführlich diskutiert - eine der zentralen Aufgaben zur Transformation zweidimensionaler Scanprofile in eine dreidimensionale Punktwolke dar. Im Rahmen der durchgeführten Systemevaluierung wurde aus diesem Grund die Qualität der berechneten Azimute in verschiedenen Messkonfigurationen untersucht.

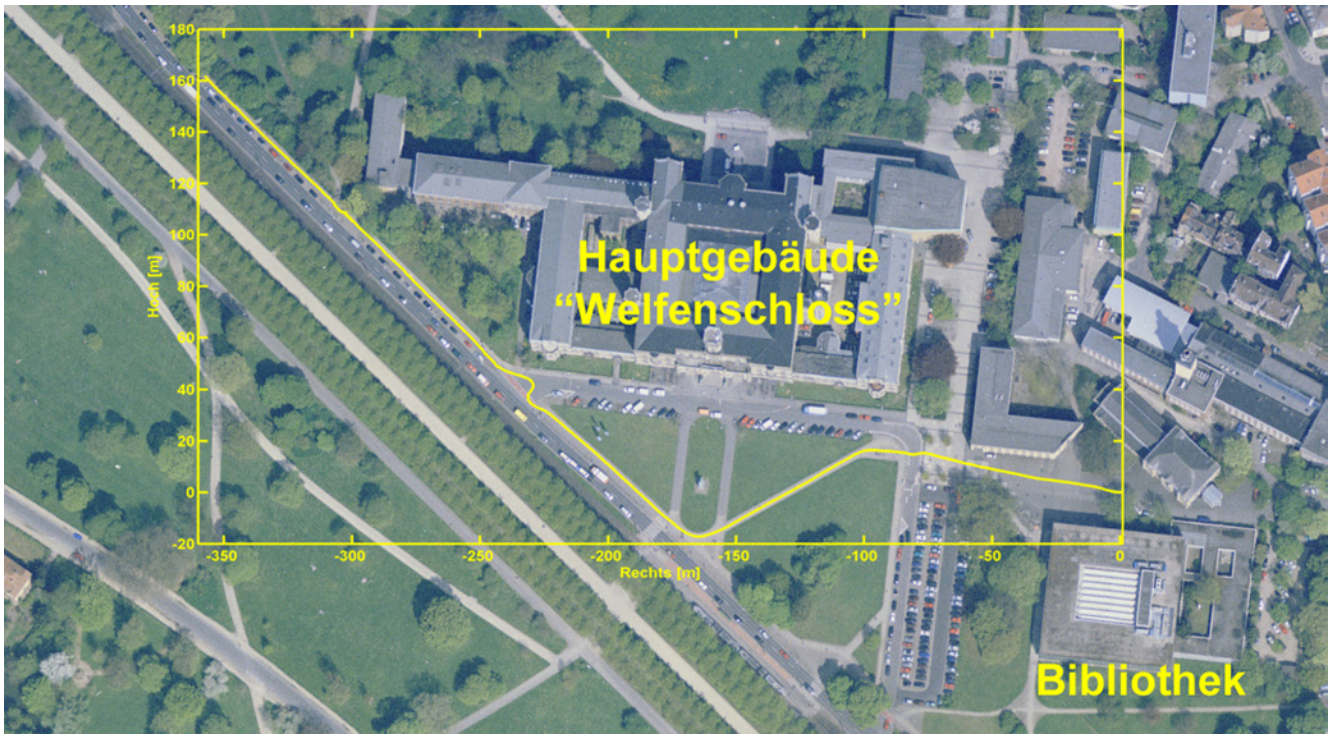


Abbildung 9.22: Trajektorie zum Vergleich der Lösungen zur Azimutbestimmung
Luftbild: Copyright LGN (2007)

Zunächst sollten die aus der geglätteten Trajektorie eines GPS-Empfängers (Abbildung 6.4, Seite 76) über Kalman-Filterdaten abgeleiteten Azimute mit den direkt beobachteten Raumwinkeln einer IMU verglichen werden. In einer ersten Vergleichsmessung kam eine IMU vom Typ „AEROcontrol“ der Firma IGI GmbH zum Einsatz, die vom Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover zur Verfügung gestellt wurde und aufgrund ihrer hohen relativen Genauigkeiten als Referenz für die Azimutbestimmung genutzt werden kann. Die Messungen wurden auf einem Freigelände vor dem Hauptgebäude der Universität durchgeführt, das in Abbildung 9.22 zusammen mit der abgefahrenen Trajektorie zu sehen ist.

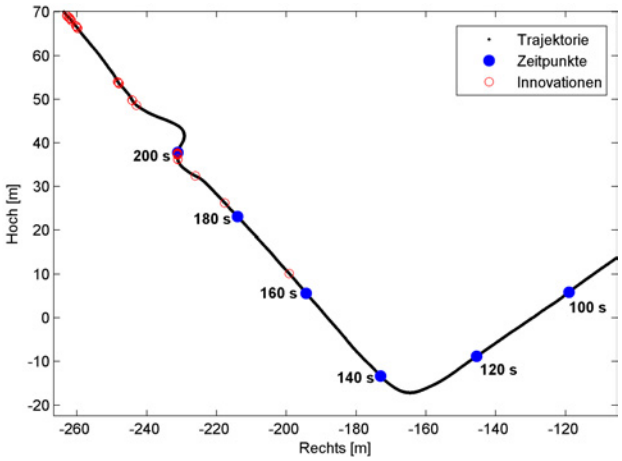


Abbildung 9.23: Auswertezeitraum und Innovationen des Zustandsvektors

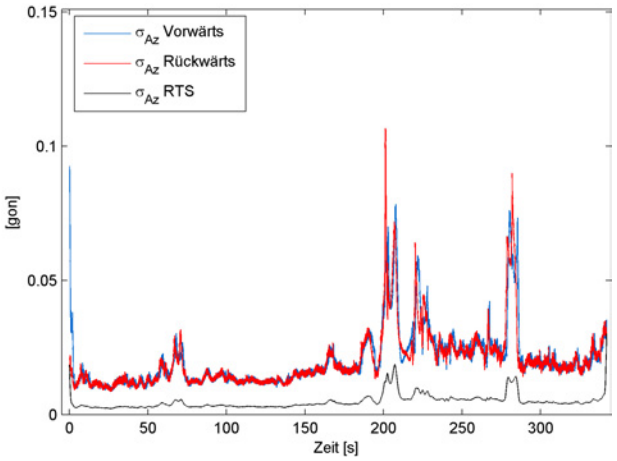


Abbildung 9.24: Standardabweichungen der gefilterten Azimute

Die insgesamt 437 m lange Strecke, die innerhalb einer Zeitspanne von 330 Sekunden befahren wurde, erstreckte sich von der Bibliothek aus über den Vorplatz des Hauptgebäudes und entlang der Nienburger Straße. Im Rahmen der Filterung der GPS-Beobachtungen wurden zahlreiche Unverträglichkeiten des funktionalen Modells detektiert, die sich als signifikante Innovationen im Kalman-Filter zeigen zu deutlichen Erhöhungen der Standardabweichungen der abgeleiteten Azimute führen (Abbildung 9.23).

Die Standardabweichungen der aus Vorwärts- und Rückwärts-Filterung sowie aus der RTS-Glättung abgeleiteten Azimute sind in Abbildung 9.24 zu sehen. Im Vorgriff auf Ergebnisse der empirischen Azimutbestimmung in Kapitel 9.4.2 ist anzumerken, dass die Standardabweichungen der berechneten Azimute signifikant besser sind als die durch empirische Untersuchungen ermittelten (Tabelle 9.2). Der Grund hierfür liegt in hohem Maße in der Vernachlässigung der physikalischen Korrelationen bei der GPS-gestützten Positionsbestimmung, die insbesondere bei hohen Abtastraten von mehr als 1 Hz auftreten. Diese starken positiven Korrelationen werden durch das weiße Rauschen, das im verwendeten stochastischen Modell des Kalman-Filters vorausgesetzt wird, nicht modelliert und führen somit zu einer zu optimistischen Schätzung für die Standardabweichungen der Punktpositionen und der Geschwindigkeitsvektoren.

Aus diesem Grund werden die auftretenden Abweichungen zwischen innerer und äußerer Genauigkeit der Azimutbestimmung nicht nur durch unberücksichtigte systematische Effekte hervorgerufen, sondern sind vielmehr auf modellbedingte Gründe zurückzuführen. Zur besseren Anpassung des stochastischen Modells kann der bereits in Kapitel 6.2.1 diskutierte Formfilteransatz verwendet werden.

Um optimale Empfangsbedingungen der Satellitensignale zu gewährleisten, wurde der für die Auswertung zu verwendende Trajektorienabschnitt entsprechend den örtlichen Gegebenheiten angepasst. So existieren sowohl in der Nähe des Bibliotheksgebäudes als auch im Verlauf der Nienburger Straße Bereiche, in denen der Empfang von Satellitensignalen durch hohe Bauwerke und dichte Vegetation teilweise stark abgeschattet ist. Eine genaue Beschreibung der Rahmenbedingungen einer Messung sowie des Untergrundes kann Tabelle 9.1 entnommen werden.

Abbildung 9.25 zeigt die aus Kalman-Filterdaten sowie Messungen der IMU abgeleiteten Azimute des gewählten Streckenabschnitts mit jeweils zwei Geraden und einer Linkskurve, die zwischen Sekunde 130 und 145 durchfahren wurde. Um einen Bezug zwischen den dreidimensionalen Punktpositionen und den dazugehörigen Azimuten vornehmen zu können, wurde eine Verknüpfung über den Referenzierungszeitpunkt der Daten ab Beginn der Messung umgesetzt. Der von GPS-Abschattungen unbeeinflusste Streckenabschnitt wurde von der mobilen Plattform somit zwischen Sekunde 100 und Sekunde 180 des Erfassungszeitraums befahren (Abbildung 9.23). Aus dieser Darstellung ist klar zu erkennen, dass auch auf den Geradenabschnitten sinusförmige Azimutänderungen durch IMU und GPS-Empfänger aufgezeichnet wurden, obwohl die Strecke überwiegend frei von Hindernissen war. Da diese Oszillationen weder durch die Schrittfrequenz noch durch niederfrequente Eigenbewegungen des Fahrzeuges erklärt werden können, ist ihre Ursache in Lenkbewegungen zu vermuten, die zur Korrektur der Fahrzeugtrajektorie vorgenommen wurden.

Bei der Auswertung dieser Messungen ist das aus Kapitel 9.3.3 bekannte Rollen des Fahrzeuges zu beachten, das aufgrund von seitlichen Eigenbewegungen zu scheinbaren Azimutänderungen der GPS-

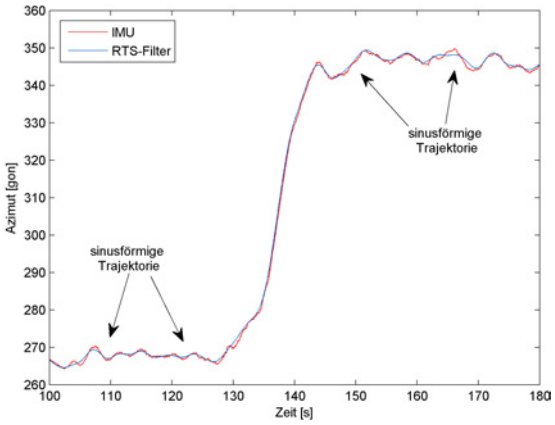


Abbildung 9.25: Azimute des Messwagens in der Übersicht

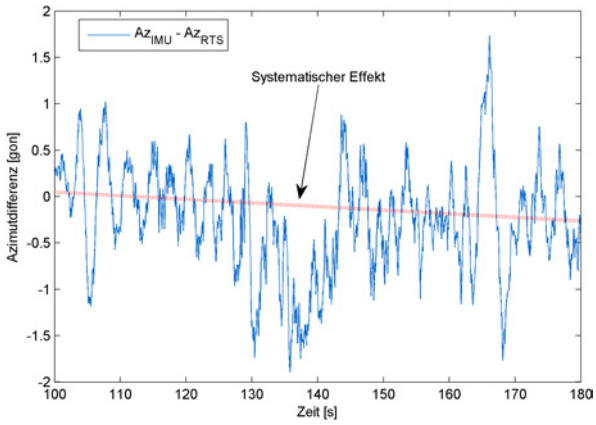


Abbildung 9.26: Azimutdifferenz zwischen IMU und RTS-Bestimmung

Trajektorie führt und somit als systematische Abweichung in die Berechnung der Punktwolke eingeht. Auch die vorhandenen sinusförmigen Bewegungen auf gerader Strecke führen zu Querbeschleunigungen des Fahrzeuges, die vom Inklinometer nicht von realen Neigungswerten getrennt werden können und unter Umständen zu Überkompensationen der neigungsbedingten Korrektion von GPS-Positionen führen.

Die Differenzen zwischen den durch IMU-Messungen bestimmten Azimuten und einer RTS-geglätteten Lösung eines GPS-Empfängers können Abbildung 9.26 entnommen werden. Sie bewegen sich in einer Bandbreite von 3 gon und liegen somit deutlich über den Abweichungen, die durch differentielle GPS-Phasenmessungen (Kapitel 3.7.2) erzielt werden können. Auffällig ist jedoch, dass die Azimutdifferenz von einer sichtbaren Oberschwingung mit einer Periodenlänge von mehreren Sekunden und einer Amplitude von 1 gon überlagert ist. Zudem existieren drei kurze Abschnitte mit systematischen Abweichungen (105 s, 130 s - 145 s, 165 s), die auch aus den Einzelazimuten in Abbildung 9.25 ersichtlich sind. Neben periodischen Einflüssen ist die dargestellte Zeitreihe zudem von einem Trend überlagert, der unter Umständen auf eine nicht kompensierte Drift der IMU zurückzuführen ist.

Während die Azimutdifferenz im mittleren Abschnitt auf einen nicht ausreichend korrigierten Schleppkurveneffekt der GPS-Positionen im Kurvenbereich zurückzuführen ist, kann für die beiden anderen Abschnitte keine eindeutige Ursache bestimmt werden. Der an diesen Stellen sichtbar glattere Verlauf des Azimutes aus RTS-geglätteten Messwerten ist möglicherweise durch eine zu starke Glättung der Trajektorie bedingt. Neben einem solchen „Ausrundungseffekt“ bei engen Kurvenfahrten ist auch die Überkompensation der Fahrzeugneigungen durch Querbeschleunigungen denkbar, die zu erhöhten Korrektionen in Richtung der Kurveninnenseiten führen und somit ebenfalls eine Ausrundung bewirken.

Die angesprochenen Ausrundungseffekte durch die Glättung der Trajektorie mit Hilfe des RTS-Algorithmus sind auch in der Detailansicht eines Abschnittes der befahrenen Strecke zu sehen (Abbildung 9.27). Obwohl die Fahrbahn in diesem Abschnitt glatt und eben ist, treten dennoch Abweichungen von bis zu 1 gon im Vergleich zu den Messwerten der IMU auf, die sich bei weniger starker Glättung der GPS-Beobachtungen noch verstärken. Anhand dieses Beispiels ist die Grenze der Nutzbarkeit von reinen GPS-Beobachtungen zur Bestimmung azimutaler Winkel gut zu erkennen. Auf der einen Seite wird eine Glättung der Trajektorie zwingend benötigt, um den Einfluss des Signalrauschens der GPS-Messungen zu verringern, auf der anderen Seite treten die hierdurch erzielten Ausrundungseffekte insbesondere in Kurven stark hervor.

Anhand der Übertragung der ermittelten Azimutdifferenzen in den Objektraum wird deutlich, dass Abweichungen dieser Größenordnung selbst unter guten Empfangsbedingungen in der Nähe der erzielbaren Genauigkeit von kinematischen Einzelpunktpositionen liegen. So beträgt der Abstand zweier aufeinander folgender GPS-Positionen bei der hier realisierten Fahrtgeschwindigkeit von 1.5 m/s und 10 Hz Abtastrate 0.15 m. Die vorhandenen Azimutdifferenzen zum Sollwert entsprechen somit einer Querabweichung eines Punktes nach RTS-Glättung von 2.4 mm ohne Drehung des Fahrzeugs. Unberücksichtigt bleiben in dieser Abschätzung zudem die durch unvollständig korrigierte Neigungen der Fahrzeuges hervorgerufenen Resteffekte, die sich in gleicher Weise auf die Azimutbestimmung auswirken.

Zur näheren Betrachtung der in Abbildung 9.26 dargestellten Azimutdifferenzen erfolgte nach Trendabspaltung eine Transformation in den Frequenzbereich. Das in Abbildung 9.28 gezeigte Amplitudenspek-

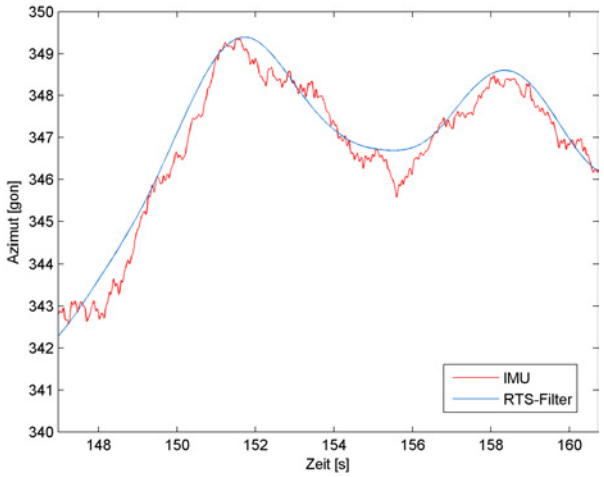


Abbildung 9.27: Azimute aus IMU und RTS-Filterung im Detail

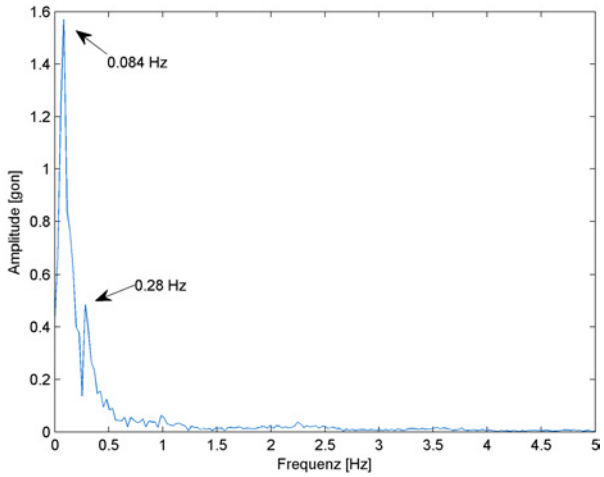


Abbildung 9.28: Amplitudenspektrum der Azimutdifferenz

trum lässt zwei Frequenzen mit 0.28 Hz sowie 0.084 Hz erkennen, die jedoch keinen Ursachen zugeordnet werden können.

Im Rahmen einer zusätzlichen Evaluierung wurde das implementierte Verfahren zur Azimutbestimmung mit den Werten einer hochpräzisen „LASERNAV II“-IMU von Honeywell des Institutes für physikalische Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt verglichen. Im Gegensatz zu vorangegangenen Untersuchungen wurde das Messsystem in diesem Fall auf einem Anhänger adaptiert und von einem Kfz über ein annähernd rechteckiges Testgelände mit einer Ausdehnung von 100 m x 100 m bewegt. Die Fahrbahn bestand hierbei aus einer vergleichsweise ebenen Betonoberfläche, die Empfangsbedingungen für GPS-Signale können aufgrund der geringen Abschattungen als sehr gut bezeichnet werden.

Abbildung 9.29 zeigt die während der Messdauer von 150 Sekunden zurückgelegte Trajektorie sowie die Korrektionswerte der GPS-Positionen aufgrund von Nick- und Rollbewegungen des Anhängers. Die roten Vektoren kennzeichnen hierbei die horizontalen Abweichungen der GPS-Antenne vom Ursprung des Anhänger-Koordinatensystems in überhöhter Darstellung. Es zeigt sich, dass die Differenz zwischen Antennen- und Fahrzeugposition insbesondere in den Kurvenbereichen stark variiert und hierdurch zu fehlerhaft bestimmten Azimutwerten führt.

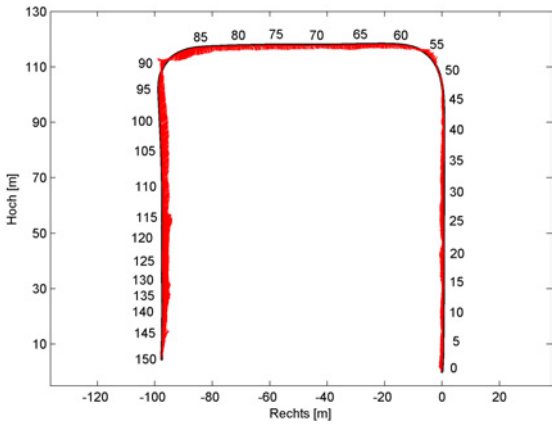


Abbildung 9.29: Abgefahrene Trajektorie mit Antennenposition

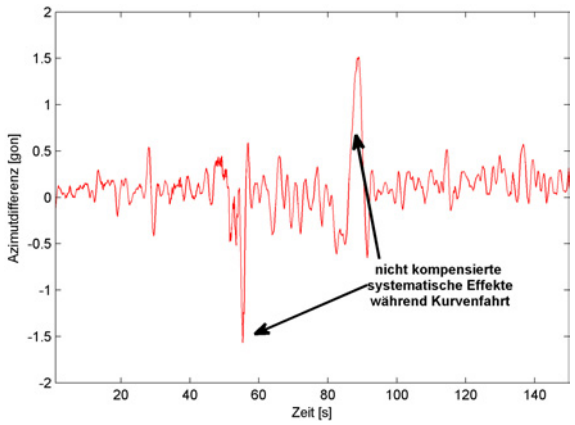


Abbildung 9.30: Azimutdifferenzen IMU-Filter

Die Differenzen zwischen IMU und RTS-geglätteten Azimuten liegen bei der vorliegenden Messung in einer Bandbreite zwischen 0.5 gon und 1 gon mit Spitzenabweichungen in den Kurven von bis zu 1.5 gon. Hierbei entsprechen sowohl das Auswerteverfahren als auch die Parameter des stochastischen Modells den Werten der vorangegangenen Auswertung auf dem Vorplatz des Hauptgebäudes der Universität Hannover, so dass die Gründe für die signifikant verminderten Differenzen vornehmlich in der Fahrzeugdynamik zu suchen sind. So besitzt der verwendete Anhänger zum einen ein deutlich höheres Eigengewicht von mehr als 500 kg sowie eine hieraus resultierende größere Massenträgheit. Zum anderen

werden sowohl Beschleunigungs- als auch Lenkvorgänge von der Zugmaschine ausgeführt und aus diesem Grund gleichmäßiger umgesetzt als bei einer manuellen personengebundenen Bewegung.

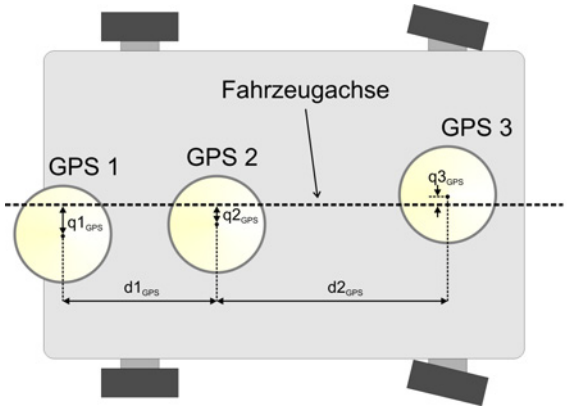
Demgegenüber sind die in Abbildung 9.30 erkennbaren systematischen Effekte an den beiden Kurvenausgängen auf den variablen Drehpunkt des Anhängers zurückzuführen, der aufgrund des kurzen Radstandes von 0.8 m je nach Lastverteilung auf der vorderen oder hinteren Achse liegen kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die erzielbare äußere Genauigkeit der Azimutbestimmung von einigen wesentlichen Faktoren beeinflusst wird. Hierzu zählen in erster Linie fahrdynamische Eigenschaften der verwendeten Sensorplattform, die deutlichen Einfluss auf mögliche Nick- und Rollbewegungen haben. Von diesen Parametern hängt unter anderem die Kompensierbarkeit der auftretenden Antennenbewegungen durch Inklinometermessungen ab, durch die systematische Abweichungen der abgeleiteten Azimute vermieden werden können. Nicht zuletzt besitzt der Grad der Glättung durch den verwendeten RTS-Algorithmus, insbesondere bei schnellen Kurvenfahrten, signifikanten Einfluss.

Die im Rahmen der empirischen Feldversuche ermittelte äußere Genauigkeit bewegt sich bei geringem Einfluss von Fahrzeugbewegungen im Bereich von 0.5 gon bis 1.0 gon, bei Beschleunigungs- und Positionsänderungen der Sensorplattform mit höherer Frequenz hingegen zwischen 1.5 gon und 3.0 gon.

9.4.2 Innere Genauigkeit der relativen DGPS-Lösung

Neben einem absoluten Vergleich mit den Messwerten eines übergeordneten Normals, in diesem Falle einer hochpräzisen IMU, sollen im Folgenden die beiden Verfahren der Azimutbestimmung aus den RTS-geglätteten Messwerten der Trajektorie eines Empfängers und der Bestimmung über relative DGPS-Messungen verglichen werden.



Element	q [mm]	d [mm]	Winkel [gon]	
GPS 1	22.8	605.4		
GPS 2	14.6			
GPS 3	4.5	735.0		
Basis 1-2			0.87	Δ=0.79
Basis 1-3			1.66	

Abbildung 9.31: Abweichung zwischen Antennenposition und Fahrzeugachse

Ausgehend von den im Rahmen der Kalibrierung ermittelten Sollkoordinaten der GPS-Antennen im Fahrzeugkoordinatensystem kann die innere Genauigkeit der Azimutbestimmung ermittelt werden. Hierzu wird das aus drei Antennen gebildete Dreieck auf der Messplattform zur Berechnung eines der drei möglichen Winkel aus Azimutdifferenzen genutzt und mit dem aus Sollkoordinaten berechneten Wert verglichen. Es ist jedoch anzumerken, dass die verwendete Basis 1-2 mit einer Länge von insgesamt 0.605 m vergleichsweise kurz ist, so dass selbst geringe Positionsdifferenzen zum Beispiel durch Phasenzentrumsvariationen einen erheblichen Einfluss auf die Azimutbestimmung haben.

Abbildung 9.31 zeigt die Positionen der drei GPS-Antennen in der maximal möglichen Konfiguration sowie die aus den Sollkoordinaten gebildeten Winkel zur Fahrzeugachse, aus denen die theoretische Azimutdifferenz abgeleitet werden kann. Hierbei ist zu beachten, dass eine Bestimmung der Antennenpositionen mit Genauigkeiten von besser als 0.1 mm nicht sinnvoll erscheint, da für dieses Projekt auf eine gesonderte Bestimmung der Antennenphasenzentren verzichtet wurde.

Zur präzisen Bestimmung der Azimute wurden die Positionen aller drei GPS-Antennen bei ruhender Plattform über einen Zeitraum von 500 Sekunden mit einer Datenrate von 10 Hz beobachtet. Die Auswertung der Messungen und Ermittlung der Koordinaten im Gauß-Krüger-System erfolgte differentiell mit einer virtuellen Referenzstation des SAPOS-Netzes und kinematischer Einzelpunktpositionierung für jede Epoche.

Die in Abbildung 9.32 dargestellten Einzelpunktpositionen besitzen eine Streuungsbreite von 1 cm in allen Koordinatenrichtungen, was näherungsweise der durch vernetzte SAPOS-Beobachtungen erzielbaren

Positionierungsgenauigkeit entspricht. Erwartungsgemäß ist die Streuung der gemessenen Punkte beim Trimble 5700 aufgrund der besseren Antenne geringfügig besser als die des Trimble R8.

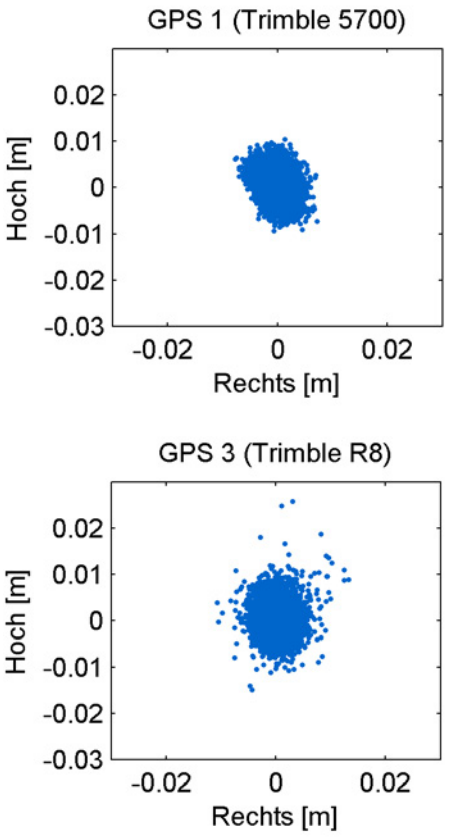


Abbildung 9.32: Einzelpunktpositionen

Aus der in Abbildung 9.31 veranschaulichten Konfiguration mit den Antennen GPS 1 bis 3 lassen sich zwei unabhängige Raumvektoren mit einer Länge von 0.60 m und 1.44 m bilden, die im Folgenden als Basis 1-2 (GPS 1 nach GPS 2) und Basis 1-3 (GPS 1 nach GPS 3) bezeichnet werden sollen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Länge der Basis 1-2 bewirken die stochastischen Punktbewegungen der Antennen ein höheres Rauschen der Winkelmessung als dies bei der Basis 1-3 der Fall ist.

Der zeitliche Verlauf der Azimute für die Basen 1-2 und 1-3 kann Abbildung 9.33 entnommen werden. Aus den vorliegenden Zeitreihen ist ersichtlich, dass beide Messgrößen von unterschiedlichen systematischen Effekten in der Größenordnung von bis zu 0.5 gon überlagert sind. Diese sind in erster Linie auf Veränderungen in der Satellitenkonfiguration zurückzuführen, können jedoch durch eine weitere Differenzbildung der beiden Azimutwinkel teilweise eliminiert werden.

Eine Transformation der Zeitreihe des Azimutes von Basis 1-3 in den Frequenzraum ergibt eine klar erkennbare Frequenz von 1 Hz sowie die dazugehörigen höheren harmonischen Schwingungen (Abbildung 9.34). Da Bewegungen der Antennen für die Dauer der Messung ausgeschlossen werden können und die Abtastrate der Empfänger 10 Hz betrug, kommt nur die Taktrate der virtuellen SAPOS-Referenzstation als Erregerfrequenz in Betracht, die mit Hilfe des in Kapitel 3.6.4 beschriebenen Interpolationsansatzes auf 10 Hz erhöht wurde. Somit bleibt zu vermuten, dass durch den gewählten linearen Ansatz zwischen zwei benachbarten Epochen systematische Effekte mit einer Frequenz von 1 Hz in den Daten verbleiben.

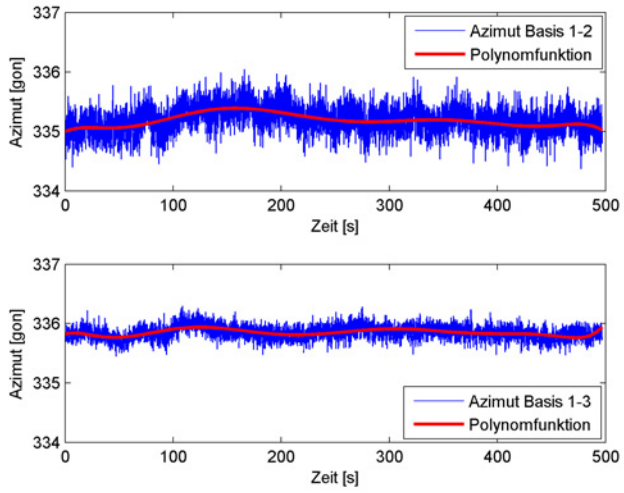


Abbildung 9.33: Azimute der Basen durch relatives DPGS

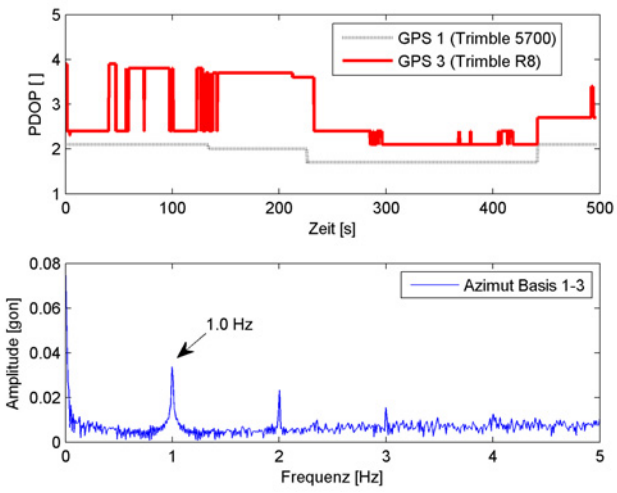


Abbildung 9.34: PDOP und Frequenzspektrum der Basis 1-3

Der Vergleich der Azimutwerte aus Kalibrierungs- und direkten GPS-Messungen in Tabelle 9.2 macht deutlich, dass Azimutdifferenzen mit Hilfe relativer GPS-Messungen mit Standardabweichungen von 0.12 gon zum Sollwert bestimmbar sind. Unter Berücksichtigung der vorhandenen systematischen Effekte, die aufgrund von Variationen der Satellitenkonfiguration auf die Azimute wirken, bleibt festzustellen, dass die im vorangegangenen Kapitel bestimmten Genauigkeiten aus kinematisch prozessierten Einzelpunktpositionen als realistisch anzusehen sind.

Bestimmungselement	Azimut	Standardabweichung
Basis 1-2	335.18 gon	0.23 gon
Basis 1-3	335.85 gon	0.12 gon
Differenz	0.67 gon	0.26 gon
Sollwert	0.79 gon	-

Tabelle 9.2: Azimute der Basen aus statischer Bestimmung

9.5 Genauigkeit des Systems im Objektraum

9.5.1 Diskretisierung von Vergleichsgrößen

Das Ziel einer kinematischen Umgebungserfassung mit Mobile-Mapping-Systemen ist allgemein die Bestimmung fest definierter Punkte im Objektraum. Wie bereits diskutiert, besteht die Schwierigkeit der Datenerfassung neben der messtechnischen Realisierung des Systems vor allem in der Diskretisierung repräsentativer Objektpunkte.

Laserscanner sind im Gegensatz zu photo- und videogrammetrischen Stereobildsystemen in der Lage, dreidimensionale Punktmessungen auch über größere Entfernungen auf unstrukturierten Oberflächen vornehmen zu können, benötigen jedoch eine längere Messzeit für die Erfassung flächenhafter Objektinformationen. Dieser Zeitraum tritt bei kinematischen Anwendungen in Form von Punktabständen längs und quer zur Fahrtrichtung auf, deren Größenordnung mit Hilfe von Tabelle 6.9 auf Seite 83 abgeschätzt werden kann.

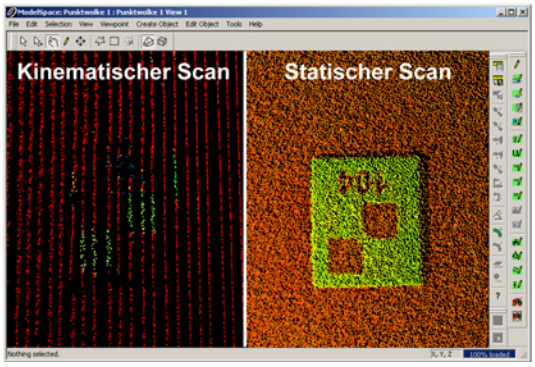


Abbildung 9.35: Vergleich zwischen kinematisch und statisch gescanntem Target

Im Rahmen der Genauigkeitsuntersuchungen wurden sowohl Zielmarken des Herstellers als auch klar identifizierbare identische Punkte am Objekt für Vergleichsmessungen verwendet. Verglichen mit Referenzkugeln, bei denen vielfach systematische Effekte an den Rändern auftreten, bieten diese Zielmarken den Vorteil, dass eine Mittelpunktbestimmung durch die ebene Form der Marke deutlich erleichtert wird. Nachteilig wirkt sich jedoch die geringe Größe der Zielmarken aus, die einen Einsatz in großen Entfernungen und bei Geschwindigkeiten von mehr als 3 m/s verhindert.

Die Problematik einer nicht eindeutig identifizierbaren Zielmarke aufgrund des bei kinematischen Aufnahmen vorhandenen Profilabstands ist in Abbildung 9.35 zu sehen, in der dieselbe Zielmarke zur besseren Vergleichbarkeit einer statischen Scanaufnahme gegenübergestellt ist. Insbesondere der Mittelpunkt, der durch den Übergang zwischen schwarzen und weißen Flächen realisiert wird, ist in der kinematischen Aufnahme deutlich schlechter bestimmbar. Die Genauigkeit eines Punktes im Objektraum $\sigma_{XYZ,3D}$ setzt sich somit aus den Komponenten der systembedingten Standardabweichung sowie der Standardabweichung der Diskretisierung zusammen:

$$\sigma^2_{XYZ,3D} = \sigma^2_{XYZ,System} + \sigma^2_{XYZ,Diskretisierung} \tag{9.1}$$

Die hierdurch definierten Genauigkeiten im Objektraum sollen in den folgenden Kapiteln im Sinne einer vollständigen Systemprüfung ermittelt werden.

9.5.2 Innere Messgenauigkeit des Systems

Zur Untersuchung der erzielbaren inneren Messgenauigkeit des Systems im Objektraum wurden verschiedene kinematische Scans auf dem Gelände des Zentrums für Hochschulsport (ZfH) der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Wie bereits erläutert, wurde die vorhandene 400 m-Laufbahn für die Systemevaluierung genutzt, da hierbei die Vorteile einer glatten Fahrbahnoberfläche ohne gleichzeitige Behinderung des laufenden Verkehrs genutzt werden können.

Abbildung 9.36 zeigt eine der Trajektorien, die für die vorliegenden Untersuchungen ausgewertet wurden. Für eine Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die möglichen Höhenvariationen durch

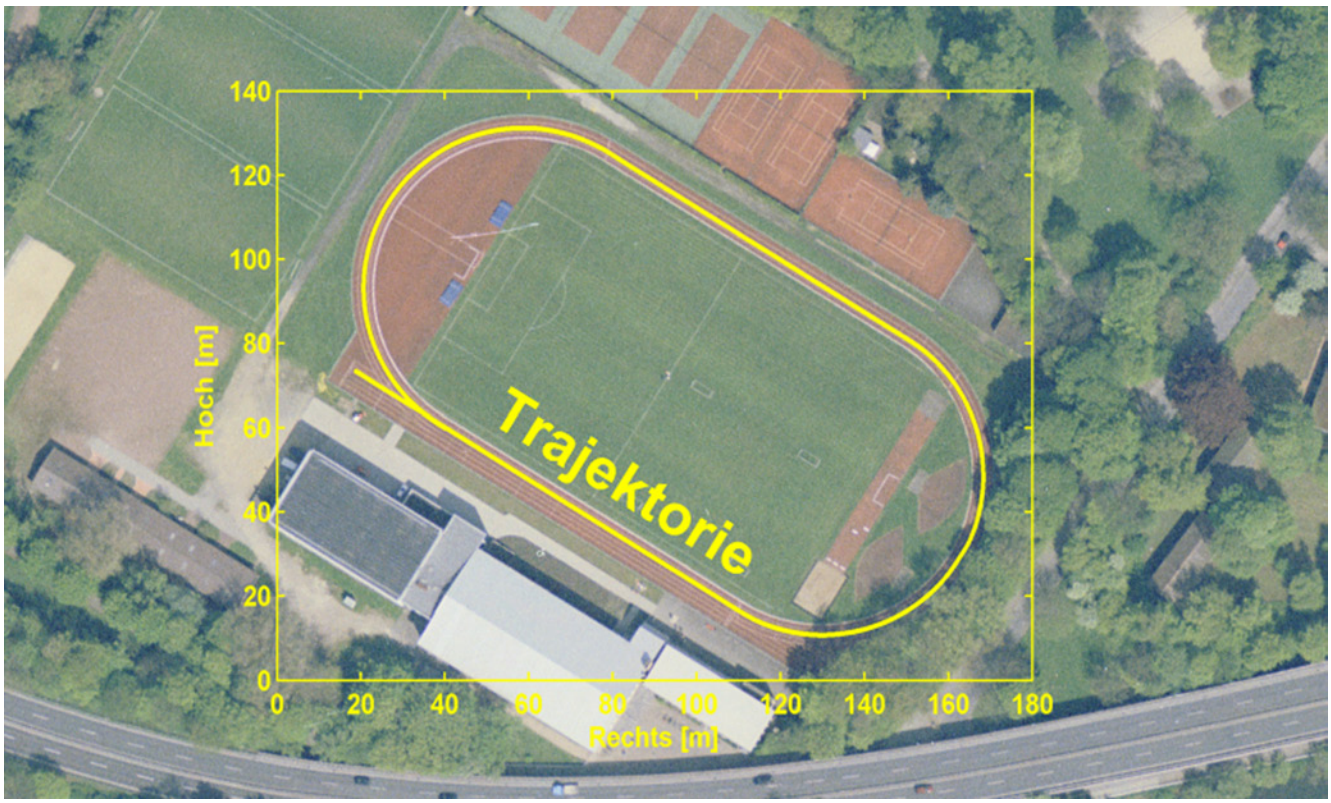


Abbildung 9.36: Befahrene Trajektorie am Zentrum für Hochschulsport
Luftbild: Copyright LGN (2007)

diese Wahl der Testumgebung sehr gering und somit nicht mit realen Straßenumgebungen vergleichbar sind. Auf der anderen Seite sind die Messergebnisse der verwendeten Testplattform aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Massenträgheit und der daraus resultierenden hochfrequenten Rollbewegungen (Kapitel 9.3.3) bei einem Einsatz auf unstetigen Geländeoberflächen nicht mit denen Kfz-gebundener Systeme vergleichbar.

Kategorie	**A**	**B**	**C1/C2**
Punktnummern (Anzahl)	1-2 (2)	3-44 (42)	45-68 (24)
Abstand vom Scanner			
Horizontal [m]	1.5 - 2.0	6.0 - 6.5	22.5 - 23.0
Vertikal [m]	0.0 - 1.5	0.0 - 1.5	6.0 - 8.5
Beschreibung	Ebene Zielmarken auf Bodenhöhe in Scannernähe	Pfeiler der Laufbahnbegrenzung in Bodenhöhe	Fensterkreuze der Sporthallen in zwei Ebenen

Tabelle 9.3: Übersicht der verwendeten Kontrollpunkte

Für die angestrebte Ermittlung der inneren Systemgenauigkeit wurden insgesamt 68 identische Punkte in den vier Entfernungsklassen A, B und C ausgewählt, um zudem eine Aussage über entfernungsabhängige Restabweichungen treffen zu können. Die Punkte der Kategorie C sind zudem in zwei Unterkategorien C1 und C2 gruppiert, da sie auf verschiedenen Ebenen am Objekt liegen. Diese identischen Punkte wurden durch Zielmarken (Kategorie A), an markanten Stellen der Laufbahnbegrenzung (Kategorie B) sowie an zwei Turnhallen gewählt (Kategorie C1 und C2), die seitlich der Trajektorie lagen. Hierdurch konnten neben unterschiedlichen horizontalen Distanzen auch Höhendifferenzen von bis zu 8 m realisiert werden, um die Güte der Korrektion verschiedener Achsabweichungen zu überprüfen (Tabelle 9.3).

Abbildung 9.37 zeigt eine Auswahl der verwendeten Objektpunkte sowie ihre Lage bezogen auf die Trajektorie des Scanners. Die kinematische Erfassung der Objektpunkte erfolgte in zwei unabhängigen Aufnahmen, die in umgekehrter Fahrtrichtung im Abstand weniger Minuten durchgeführt wurden. Der Einfluss der Satellitenkonfiguration auf die Genauigkeit der Punktbestimmung wurde durch die zeitnahe

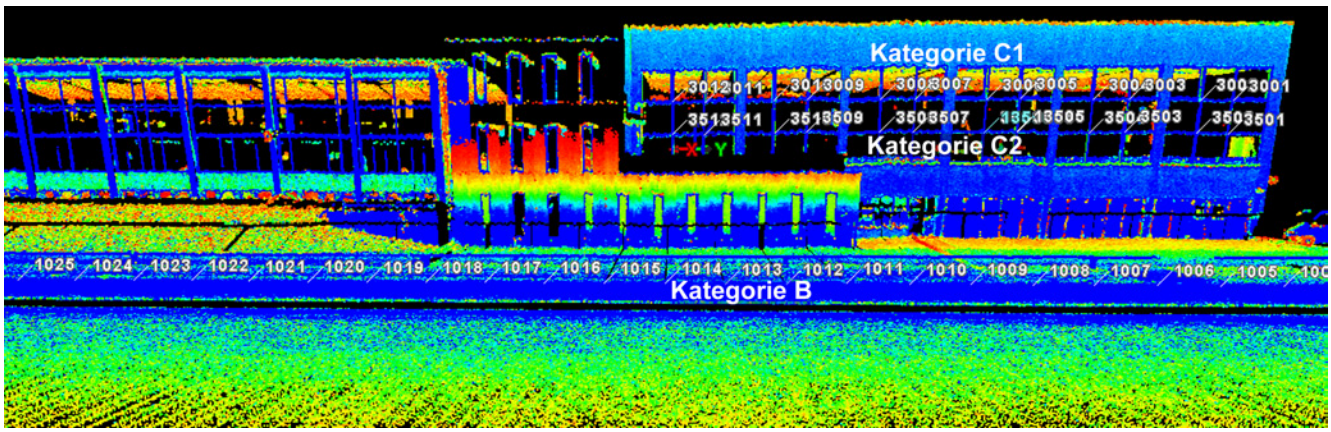


Abbildung 9.37: Übersicht der Objektpunkte

Objekterfassung im Hin- und Rückweg aufgrund der hierdurch erzeugten positiven physikalischen Korrelationen - für die horizontalen Koordinatenkomponenten - weitgehend eliminiert. Da das Ziel dieser Untersuchung in der Ermittlung der inneren Systemgenauigkeit besteht, ist ein solcher Effekt vorteilhaft. Die wesentlichen Kenngrößen der beiden kinematischen Objektaufnahmen „Eval1“ und „Eval2“ sind in Tabelle 9.4 aufgeführt.

Parameter	**„Eval1“**	**„Eval2“**
Länge der Trajektorie	168 m	161 m
Zeitraum / Datenvolumen	150 s / 533 MB	146 s / 524 MB
Geschwindigkeit[1]	1.2 m/s	1.2 m/s
Profilfrequenz / -abstand[1]	33 Hz / 3.5 cm	33 Hz / 3.5 cm

[1]Mittelwert

Tabelle 9.4: Kenngrößen der kinematischen Scans

Auch bei diesen Vergleichsmessungen führte das schon in Kapitel 9.5.1 veranschaulichte Problem der Diskretisierung von identischen Punkten zu Schwierigkeiten. Hierbei wirkte sich weniger die fehlende Identifizierbarkeit von Zielmarken oder anderen markanten Objektpunkten negativ aus. Vielmehr führten die radiometrischen Bedingungen vor Ort zu Abtastlücken durch fehlende Signalreflexion.

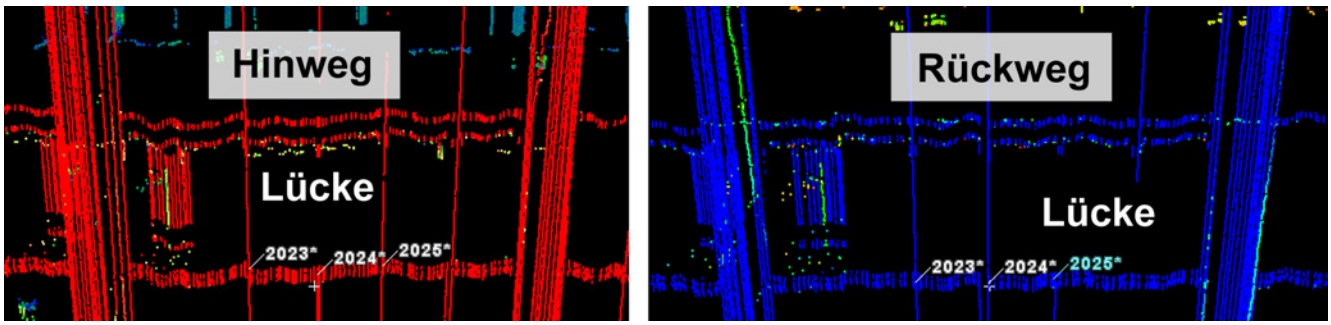


Abbildung 9.38: Diskretisierungsproblem für entfernte Objekte

So bestanden durchaus Unterschiede in der Nutzbarkeit einzelner Zielmarken zwischen der Aufnahme im Hinweg und derjenigen im Rückweg. Abbildung 9.38 verdeutlicht diese Problematik am Beispiel der Fensterkreuze, die zur Definition von Punkten der Kategorie C verwendet wurden. In diesem Fall fehlen einzelne Fensterstreben aufgrund ihrer geringen Breite und dem Profilabstand von 3.5 cm oder zu geringen Reflexionseigenschaften.

Die Differenzen zwischen den im Hin- und Rückweg gemessenen horizontalen Objektpunktkoordinaten sind in den Abbildungen 9.39 und 9.40 zu sehen. Aus dieser Darstellung geht hervor, dass die Abweichungen zwischen den erfassten Punktwolken an den Kontrollpunkten weniger als 0.1 m betragen, für die Punkte der Kategorien A und B sogar überwiegend unterhalb von 0.05 m liegen. Die ebenfalls aus diesen

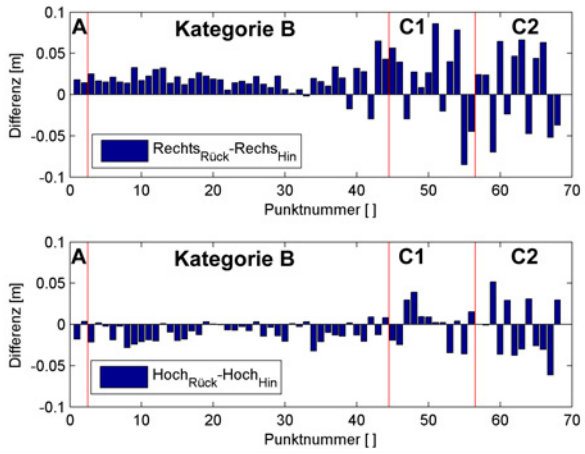


Abbildung 9.39: Koordinatendifferenzen im Rechts- und Hochwert

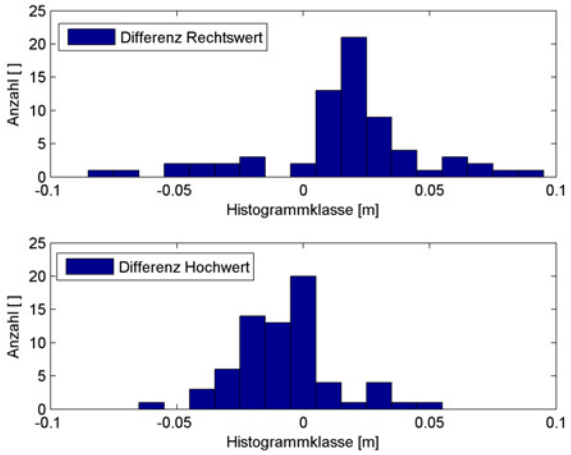


Abbildung 9.40: Koordinatendifferenzen im Rechts- und Hochwert

Abbildungen ersichtlichen Histogramme der Koordinatendifferenzen zeigen systematische Abweichungen von wenigen Zentimetern, die sich durch eine Mittelwertverschiebung der Verteilungskurven bemerkbar machen.

Auch die Abweichungen der Höhenkomponente liegen überwiegend unterhalb von 0.05 m, da sich die starke Glättung der beobachteten Höhen im Kalman-Filter aufgrund der ebenen Fahrbahnoberfläche sehr positiv auswirkt. Auch hier ist mit Blick auf die Histogrammverteilung eine geringe Restsystematik im Bereich weniger Zentimeter vorhanden, die auf eine geringere Höhe der im Hinweg erfassten Objektpunkte schließen lässt (Abbildung 9.41). Dabei ist jedoch anzumerken, dass Abweichungen dieser Größenordnung bei einer kinematischen Einzelpunktprozessierung in der Nähe der Messgenauigkeit liegen und die in Tabelle 1.1 definierten Anforderungen an die Höhenbestimmung weit übertreffen.

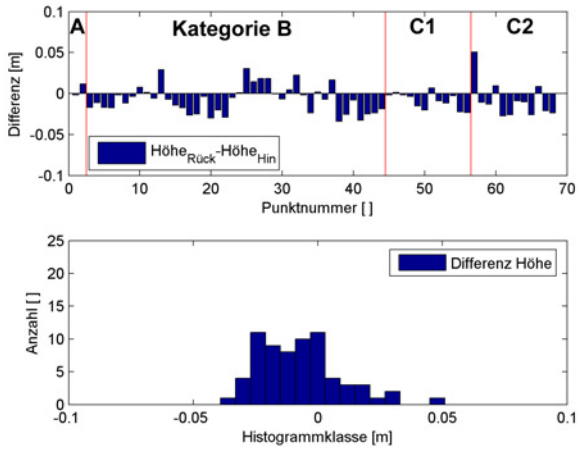


Abbildung 9.41: Koordinatendifferenzen der Höhenkomponente

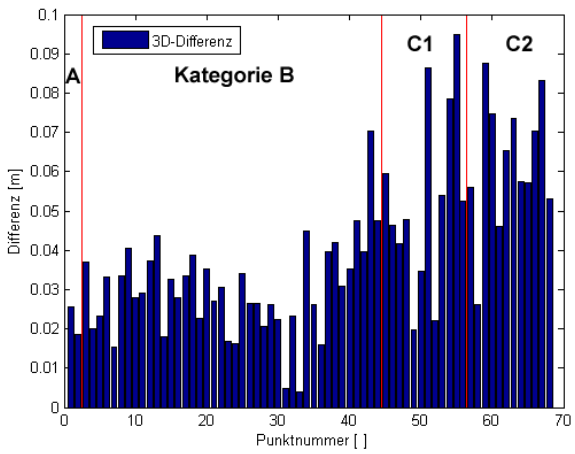


Abbildung 9.42: Dreidimensionale Koordinatendifferenzen

Darüber hinaus zeigt der Blick auf die in Abbildung 9.42 wiedergegebenen dreidimensionalen Abweichungen der Koordinaten, dass Gesamtabweichungen von 0.1 m für Punkte im Entfernungsbereich von mehr als 20 m sowie Differenzen von 0.05 m für Punkte im Nahbereich von bis zu 10 m realisierbar sind. Bei genauerer Betrachtung der Residuen von Punkten der Kategorie B fällt auf, dass vergleichbar mit den systematischen Effekten des Azimutes auch in der Höhenkomponente eine deutliche Periodizität zu erkennen ist, die durch eine periodische Rollbewegung des Wagen hervorgerufen werden kann.

Zur näheren Betrachtung der Abweichungsvektoren zwischen den beiden Aufnahmen sind die Koordinatendifferenzen in der Ebene in Abbildung 9.43 zu sehen. Die gleichmäßig orientierten Vektoren, die insbesondere bei Punkten der Kategorie B ins Auge fallen, lassen auf nicht kompensierte Effekte schließen, die translatorisch oder winkelbasiert wirken.

Um eine Aussage über räumlich begrenzte Verzerrungen innerhalb der Punktwolke treffen zu können, sind die bisher ermittelten Koordinatendifferenzen für eine Bewertung der inneren Genauigkeit nur

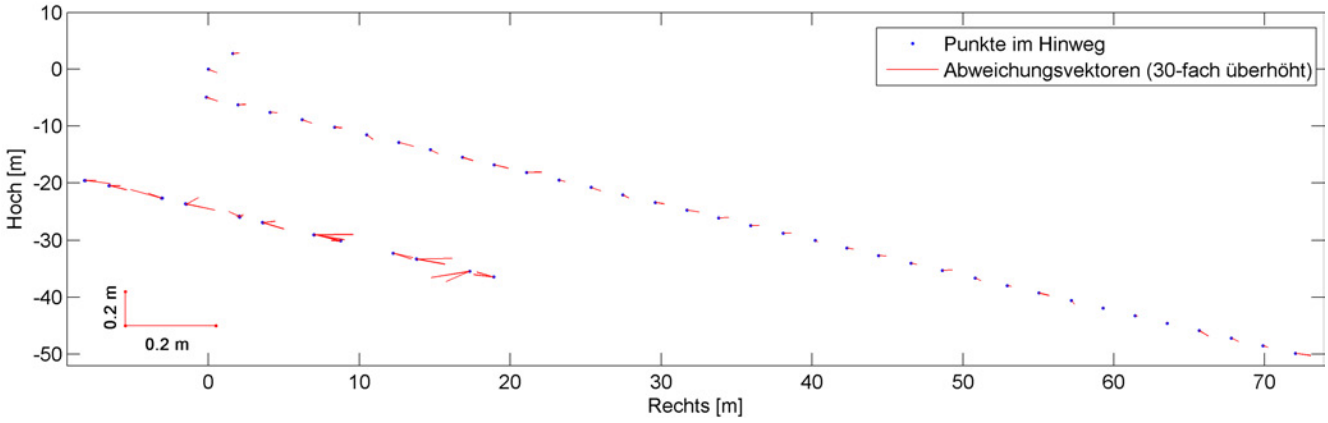


Abbildung 9.43: Horizontale Abweichungsvektoren

bedingt geeignet, da sie zusätzlich GPS-bedingte Translationen zwischen den beiden Aufnahmen enthalten. Aus diesem Grund wurden die Raumvektoren zwischen allen erfassten Punkten ermittelt und ihre betragsmäßigen Änderungen zwischen der Aufnahme im Hin- und Rückweg einander gegenübergestellt (Abbildung 9.44). Alle Punkte sind in dieser Abbildung entsprechend ihrer Lage entlang der Trajektorie gruppiert, so dass benachbarte Punkte einer Kategorie auch mit benachbarten Punktnummern versehen sind. Die Punkte der Kategorie C sind in zwei Unterkategorien, Kategorie C1 und C2, gruppiert, da sie auf unterschiedlichen Ebenen am Objekt liegen.

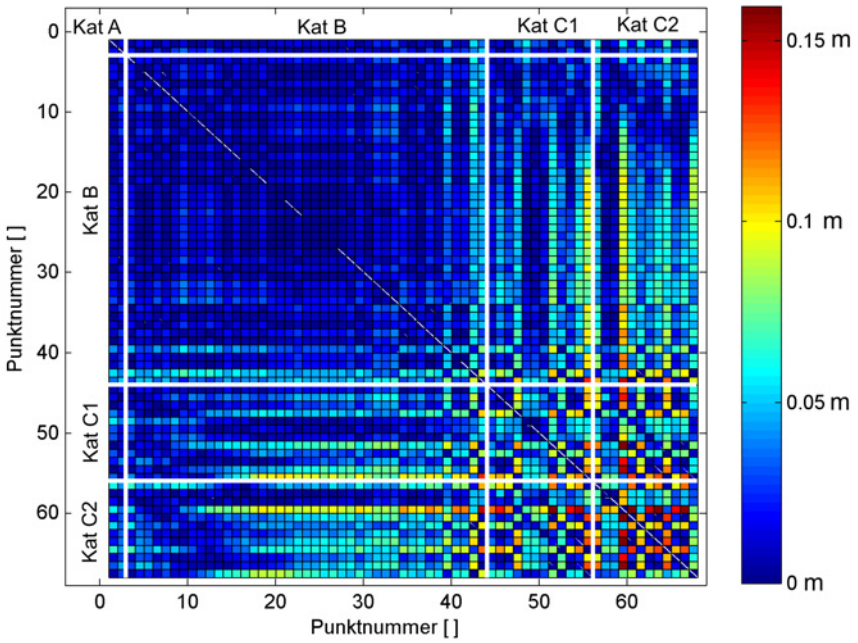


Abbildung 9.44: Differenzen der Raumvektoren zwischen allen Punkten

Hierbei sind die Änderungen der Raumstrecken zwischen den in Spalte i und Zeile k aufgetragenen Punkten im jeweiligen Quadrat i,k farblich kodiert. Die auf der Diagonalen gelegenen Null-Differenzen zwischen einem Punkt und sich selbst besitzen dementsprechend keine Differenzänderungen. Lokale Verzerrungen innerhalb der Punktwolke können durch rote Quadrate in der Nähe der Hauptdiagonalen identifiziert werden, da diese eine starke Änderung der Raumstrecken zu nahe liegenden Punkten signalisieren. Einen Hinweis auf das Vorliegen von Ausreißern geben Zeilen oder Spalten mit einem hohen Anteil roter Quadrate, da hierdurch hohe Differenzen für eine größere Anzahl an Raumstrecken zu einem einzelnen Punkt gekennzeichnet sind.

Zur Ausschaltung der noch vorhandenen Translationen zwischen beiden Datensätzen wurden die im Rückweg bestimmten Punkte mit Hilfe einer dreidimensionalen Helmert-Transformation auf die Punkte

des Hinwegs transformiert. Die Verteilung der Restklaffungen im Rechts- und Hochwert sowie in der Höhenkomponente und der resultierenden Restklaffung im Raum können den Abbildungen 9.45 und 9.46 entnommen werden.

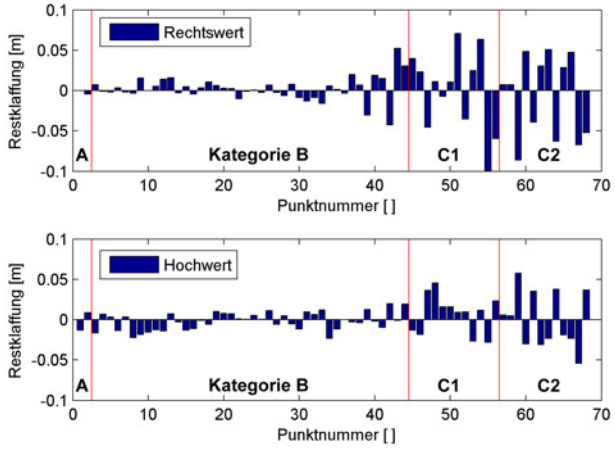


Abbildung 9.45: Restklaffungen der Rechts- und Hochkomponente

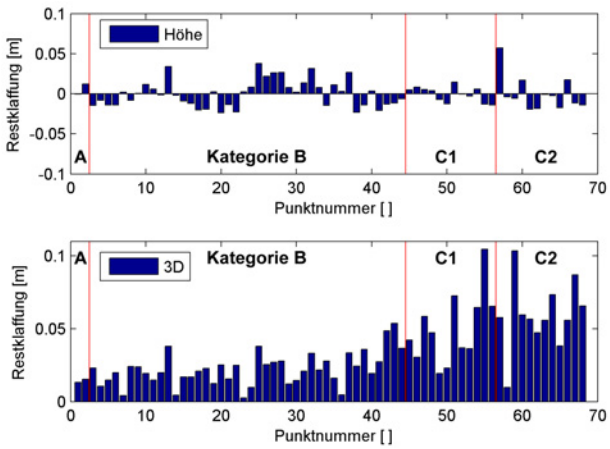


Abbildung 9.46: Restklaffungen der Höhe und Raumstrecke

Aus diesen Abbildungen ist deutlich zu ersehen, dass die in den Koordinatendifferenzen vorhandenen Abweichungen weiter verringert werden konnten. Während im Rechts- und Hochwert nunmehr überwiegend stochastische Anteile enthalten sind, besitzt die Höhenkomponente eine verbleibende Periodizität, die auf langperiodische Rollbewegungen des Fahrzeugs schließen lässt. Diese besitzen jedoch eine größere Periodenlänge als die in Kapitel 9.3.3 diskutierten Bewegungen aufgrund systematischer Effekte der Neigungsmessung. Insbesondere im Bereich der hoch gelegenen Punkte der Kategorie C sind in dieser Koordinatenrichtung jedoch deutlich geringere Restabweichungen vorhanden.

Zur Verdeutlichung der verbleibenden Restsystematiken, die direkt zu Verzerrungen innerhalb der Punktwolke führen, sind die horizontalen Restklaffungen in Abbildung 9.47 mit 200-facher Überhöhung dargestellt. Auch hier lässt sich für Punkte der Kategorie B eine leichte Periodizität parallel zur befahrenen Trajektorie vermuten, die in dieser Form durch langperiodische Azimutänderungen hervorgerufen werden kann.

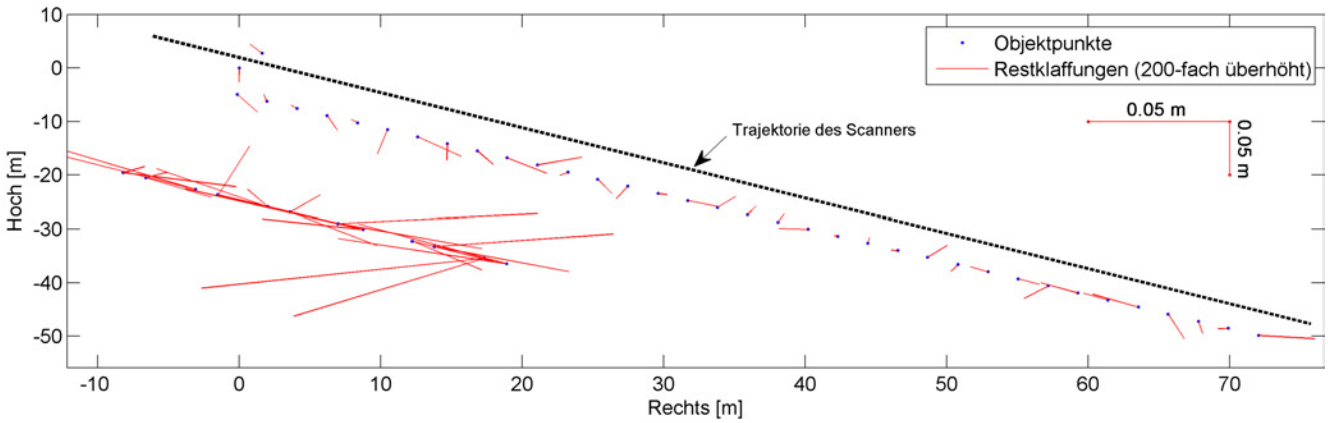


Abbildung 9.47: Restklaffungen der 3D-Helmert-Transformation in der Ebene

Ausgehend von den bereits beschriebenen Diskretisierungsproblemen der identischen Punkte kann bei einem mittleren Profilabstand von 3.5 cm davon ausgegangen werden, dass die verbleibenden Differenzen bei Verwendung besser identifizierbarer Kontrollpunkte auf Werte im unteren einstelligen Zentimeterbereich reduziert werden können. Dies gilt insbesondere, da sich die festgestellten Koordinatendifferenzen additiv aus den Abweichungen beider Objektaufnahmen zusammensetzen.

9.5.3 Äußere Messgenauigkeit des Systems

Zum Abschluss der empirischen Genauigkeitsuntersuchungen soll nach der Betrachtung der inneren Genauigkeit auch die äußere Genauigkeit des Systems mit Hilfe eines unabhängigen Messverfahrens - in diesem Fall dem „Geodätischen Präzisen Positionierungs-Service“ des SAPOS-Netzes (SAPOS-GPPS) - verifiziert werden. Der Vorteil dieses Messverfahrens besteht darin, dass Messungen unabhängig von vorhandenen Festpunkten möglich sind und zudem in einem globalen Referenzsystem vorliegen. Ausgehend von der in Tabelle 1.1 auf Seite 12 geforderten Genauigkeit des Systems von 0.2 m für die Bestimmung von Objektkoordinaten kann SAPOS-GPPS mit einer nominellen Genauigkeit von 0.01 m als ausreichend genaue Referenzlösung betrachtet werden.

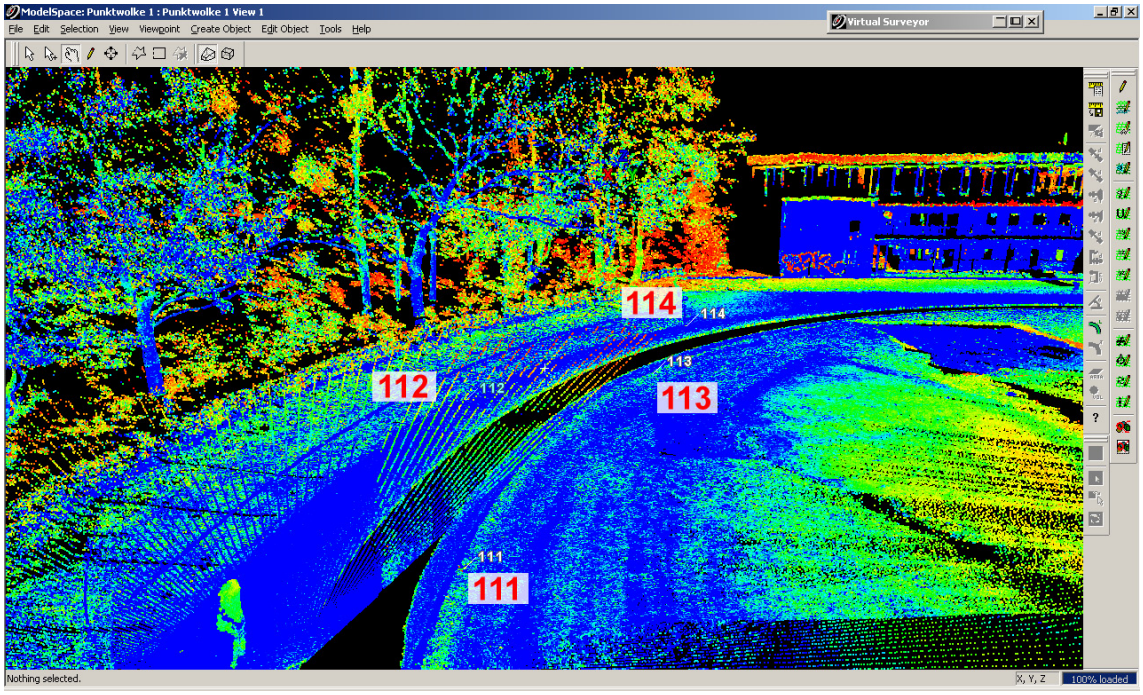


Abbildung 9.48: Punktübersicht mit abgeschatteten Zielmarken

Da die Objektpunkte, die für die Ermittlung der inneren Genauigkeit verwendet wurden, für Messungen mit einem GPS-Rover entweder direkt an Gebäuden (Kategorie C1,C2) oder unzugänglich unterhalb der Bahnbegrenzung (Kategorie B) lagen, wurden insgesamt acht Zielmarken über die halbe Länge der Laufbahn an deren Rand verteilt. Diese Punkte wurden zum Teil unterhalb von Bäumen platziert, um auch die Auswirkung von Abschattungseffekten in die Betrachtungen einzubeziehen (Abbildung 9.48).

Punkt-Nr.	ΔRechts [m]	ΔHoch [m]	ΔHöhe [m]	Scannerabstand [m]
101	-0.026	0.025	0.039	2.5
107	0.002	0.017	0.008	2.0
110	0.014	-0.010	0.026	3.0
111	-0.004	-0.016	0.002	2.0
112	-0.090	-0.076	0.112	6.5
113	-0.019	-0.023	0.042	2.5
114	-0.136	-0.061	0.129	7.0
115	0.002	0.014	0.001	4.0

Tabelle 9.5: Differenzen zur Solllösung mit SAPOS-GPPS

Die Koordinatendifferenzen zwischen der kinematischen Aufnahme durch den Scanner und den mit SAPOS-GPPS bestimmten Sollkoordinaten sind in Tabelle 9.5 aufgelistet. Mit Ausnahme der Punkte 112 und 114 liegen alle Koordinatendifferenzen in einem Bereich unterhalb 0.05 m, was der bereits ermittelten relativen Genauigkeit des Systems entspricht. Die hohen Abweichungen der angesprochenen Punkte sind auf ihre besondere Lage unterhalb einer ausgedehnten Baumgruppe zurückzuführen, da auch

ihre absoluten Höhenwerte entsprechende Abweichungen zu vergleichbar positionierten Nachbarpunkten aufweisen. Dennoch kann festgestellt werden, dass auch die absolute Genauigkeit der bestimmten Objektpunktkoordinaten die in Tabelle 1.1 definierten Anforderungen hinsichtlich Lage und Höhe deutlich übererfüllt.

Die verbleibenden nicht-stochastischen Resteffekte können grundsätzlich durch die Positionsbestimmung mit GPS, die Ausrichtung und Kalibrierung von Fahrzeug und Scanner sowie den Auswerter begründet sein. In diesem Zusammenhang sind folgende Einflussgrößen zu nennen, wobei die Buchstaben in Klammern angeben, ob die resultierenden Abweichungen mit konstantem Wert (K) oder als entfernungsabhängiger Maßstabsfaktor (M) wirken:

- Arbeitsrichtung des Benutzers in der Punktwolke (K)
- Abweichungen bei der Mittelpunktbestimmung der Kugel zur Scannerausrichtung (M)
- Zeitvarianz der Achsabweichungen des Scanners (M)
- Abweichungen bei der Definition der Fahrzeuglängsachse (M)
- Genauigkeit der Scannerausrichtung: 0.01° (M)

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass mit dem vorliegenden Prototypen sowohl relative als auch absolute Genauigkeiten im Nahbereich bis 10 m von besser als 0.05 m erreicht werden können, sofern ein ausreichender GPS-Signalempfang gewährleistet ist.

10 Vergleichende Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit des Systems

10.1 Definition von Beispielprojekten

Da sich der entwickelte Prototyp in einer direkten Konkurrenzsituation zu einer großen Anzahl existierender Messverfahren und Systeme befindet, soll abschließend eine kurze Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des Systems für Zwecke der Umgebungserfassung im Außenbereich erfolgen, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Als quantitatives Maß für die Wirtschaftlichkeit von Messverfahren kommt im Allgemeinen die betriebswirtschaftliche Kenngröße der Effizienz zur Anwendung, die das Verhältnis von eingesetzten Ressourcen zum gewünschten Ergebnis charakterisiert.

Beispielprojekt	**Welfenschloss**	**Nienburger Straße**
Gebietsausdehnung	70 m x 250 m	20 m x 610 m
Punktabstand	< 0.1 m	< 0.05 m
Objektpunktgenauigkeit	0.2 m	0.2 m

Tabelle 10.1: Anforderungen an die Objekterfassung

Neben den als Fixkosten eingehenden Anschaffungskosten des Systems ist bei der Ermittlung der Ressourcen insbesondere der zeitliche Aufwand für Messung und Auswertung zu berücksichtigen. Aufgrund des prototypischen Stadiums des vorliegenden Systems scheint ein Vergleich über anfallende Kosten nicht sinnvoll umsetzbar zu sein, zumal die Kapitalisierung des Zeitaufwands von konkreten Stundensätzen abhängig ist.

Somit soll der Schwerpunkt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auf einem exemplarischen Vergleich des zeitmäßigen Erfassungs- und Auswerteaufwands liegen. Hierzu wurden die beiden in Tabelle 10.1 aufgeführten innerstädtischen Umgebungen mit dem entwickelten Prototypen in verschiedenen Auflösungsstufen erfasst und dem Zeitbedarf für eine statische Scanneraufnahme mit dem Zoller+Fröhlich Imager 5003 gegenübergestellt.

Da hierzu der identische Sensor im dreidimensionalen Modus verwendet werden kann, sind sowohl dessen Reichweite und Messprinzip als auch die objektbedingten Anforderungen hinsichtlich der Rasterweite, der Reflektionseigenschaften sowie der Umgebungsbedingungen besser vergleichbar, als dies bei photo- und videogrammetrischen Systemen der Fall wäre. Als Anforderungen wurden Punktabstände zwischen 0.05 m und 0.1 m sowie Punktgenauigkeiten von besser als 20 cm definiert; Inhalt der Erfassung waren alle von der Straße aus sichtbaren Gebäude und topographischen Elemente.

10.2 Welfenschloss mit Vorplatz

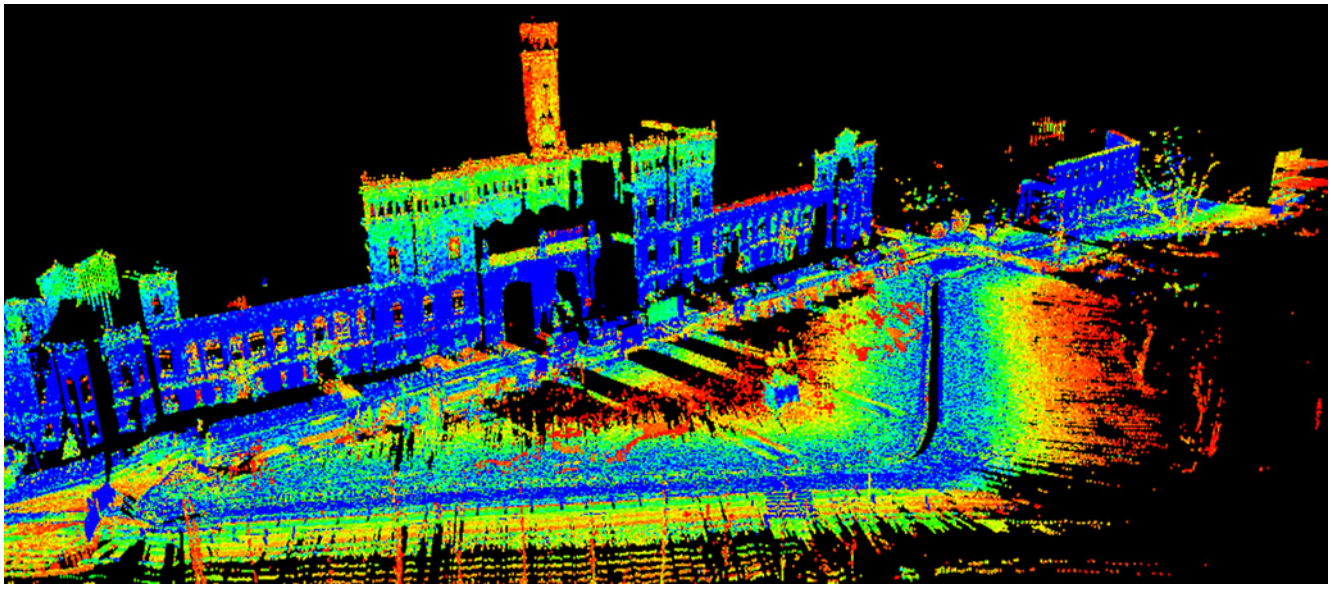


Abbildung 10.1: Welfenschloss in der Gesamtansicht (Scanauflösung mittel/gering)

Als erste der beiden Vergleichsumgebungen wurde der Außenbereich vor dem Hauptgebäude der Leibniz Universität Hannover ausgewählt, der von den Untersuchungen zur Genauigkeit der Azimutbestimmung bekannt ist. Dieser besteht neben dem Hauptgebäude sowie einer ausgedehnten Freifläche aus verschiedenen Verwaltungsgebäuden, der Universitätsbibliothek (Abbildungen 9.22, 10.1) und einem langgestreckten Abschnitt im weiteren Verlauf der Nienburger Straße (Abbildung 10.5).

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der gesamte Erfassungsvorgang in einzelne Schritte, bestehend aus den notwendigen Vorarbeiten, der Erfassung durch kinematisches oder terrestrisches Laserscanning sowie der Auswertung der Scandaten, unterteilt. Tabelle 10.2 vergleicht den zeitlichen Aufwand einer statischen Erfassung (S1) mit dem Zeitbedarf für zwei kinematisch erfasste Objekaufnahmen, die im April 2007 (K1) sowie im April 2006 (K2) durchgeführt wurden. Weiterführende Informationen über die Ergebnisse des Beispielprojekts K2 können Hesse und Neumann (2007) entnommen werden. Die angegebenen Vergleichswerte für eine statische Aufnahme wurden auf Grundlage der vorhandenen Projekterfahrung des Geodätischen Instituts der Leibniz Universität Hannover geschätzt.

Beispielprojekt	**S1**	**K1 (2007)**	**K2 (2006)**	**K3 (2007)**[1]
Scanmodus	statisch	kinematisch	kinematisch	kinematisch
Objektauflösung[2]	Sehr hoch	Mittel	Gering	Sehr Hoch
Punktabstand[2]	< 3 cm	9.5 cm	17.0 cm	2.5 cm
Anzahl Scanpunkte	-	8.5 Mio	3.8 Mio	35.3 Mio[4]
Datenvolumen[4]	-	325 MB	140 MB	1.4 GByte
Anzahl Standpunkte	7	-	-	-
Anzahl Passpunkte	35	-	-	-
Einrichtung der Passpunkte	60 min	-	-	-
Standpunkt (Einzeln/Gesamt)				
- Objekt- und Passpunktscan	(10/70) min	7 min	4 min	4 min
- Standpunktumbau	(3/21) min	-	-	-
Auswertung				
- Standpunktverknüpfung	90 min	-	-	-
- GPS mit SAPOS-VRS	-	5 min	5 min	5 min
- Trajektorie und Punktwolke[3]	-	29 min	13 min	130 min
Summe	241 min	41 min	22 min	139 min
bezogen auf S1	100%	17%	9%	n.vglb.[5]

[1] Nur Fassade des Welfenschlosses; [2] In Fahrtrichtung; [3] Rechner: Pentium 4, 3.4 GHz, 1 GB RAM

[4] Im Unterschied zu Tabelle 4.3 ist hier das Datenvolumen der georeferenzierten Punktwolke angegeben

[5] Das Projekt K3 ist durch die geringere Objektausdehnung nicht vergleichbar

Tabelle 10.2: Erfassungsaufwand für das Projekt „Welfenschloss“

Während bei der statischen Aufnahme der überwiegende Teil des Zeitbedarfs für die Einrichtung der Passpunkte und den Scan der Objekte benötigt wird, erfolgt die reine Objekterfassung beim kinematischen Verfahren automatisiert aus der Bewegung heraus und kann somit deutlich schneller durchgeführt werden. Bei diesem Verfahren liegt der Schwerpunkt vielmehr auf der Berechnung der Punktwolke, die im Vergleich zur Standpunktverknüpfung bei statischen Scans jedoch vollständig automatisiert ablaufen kann. Der für die Berechnung der Trajektorie und Transformation der Profildaten verwendete Zeitrahmen hängt signifikant von der zur Verfügung stehenden Rechenleistung des Auswerte-PCs ab und kann somit durch eine Implementierung multitaskingfähiger Algorithmen (Kapitel 5.2.7) weiter verringert werden.

Der Vergleich der Messverfahren macht deutlich, dass die kinematische Objekterfassung selbst bei flächenhaften Objekten durch den Verzicht auf Passpunkte und die Möglichkeit der bewegten Objekterfassung Zeitvorteile von 83% bis 91% ermöglicht, wenn eine Befahrbarkeit des Geländes gewährleistet ist. Es ist jedoch zu beachten, dass die kinematische Aufnahme in Längsrichtung eine niedrigere Auflösung als statische Scans besitzt, die sich auch in einer geringeren Berechnungszeit widerspiegelt.

Die in Tabelle 10.2 aufgeführten Daten zeigen, dass Datenvolumen und Prozessierungszeit nicht nur von der Fahrtgeschwindigkeit, sondern auch von der Profilrate und der damit verbundenen Auflösung in Querrichtung abhängen. Da die Geschwindigkeit der Auswertealgorithmen noch nicht optimiert wurde, sind die Zeitangaben im Hinblick auf zukünftige Messungen vielmehr als Näherungswerte zu betrachten.

10.3 Fassade des Welfenschlosses

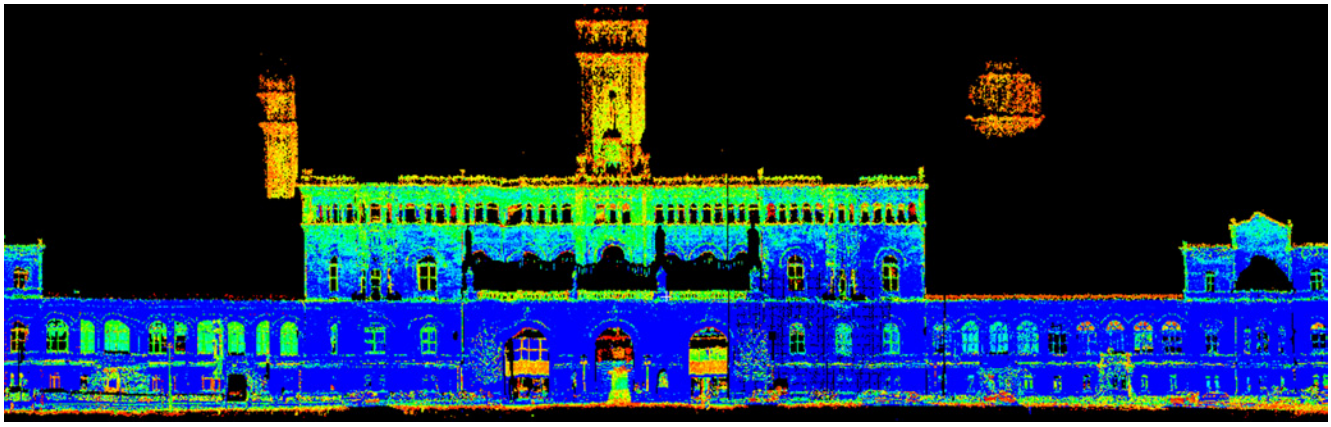


Abbildung 10.2: Fassade des Welfenschlosses in sehr hoher Scanauflösung (Projekt K3)

Um darüber hinaus die Prozessierungszeit eines kinematischen Scans zu ermitteln, der eine mit statischen Scans vergleichbare Objektauflösung besitzt, wurde die 130 m lange Fassade des Welfenschlosses in der mit K3 bezeichneten Aufnahme mit einer Geschwindigkeit von 0.5 m/s und einem Profilabstand von 2.5 cm erfasst (Hesse und Kutterer, 2007).

Bereits aus dem visuellem Vergleich der beiden Abbildungen 10.1 und 10.2 ist ersichtlich, dass die kinematisch erfasste Punktwolke der Fassade (K3) zwar eine vergleichbare Scandauer wie Aufnahme K2 benötigt, hinsichtlich ihrer Objektauflösung jedoch einem statischen Scan entspricht.

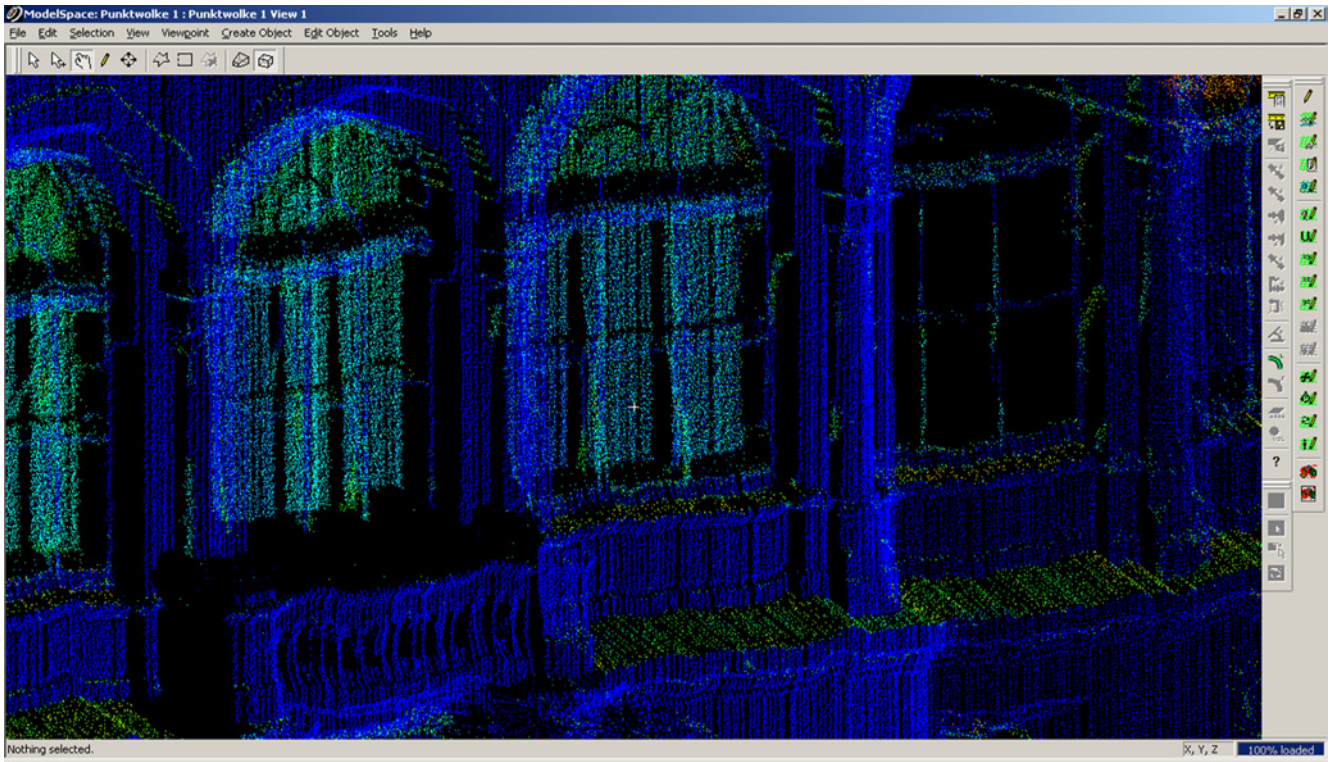

ModelSpace: Punktwolke 1 : Punktwolke 1 View 1
File Edit Selection View Viewpoint Create Object Edit Object Tools Help
Nothing selected.
X, Y, Z
100% loaded

Abbildung 10.3: Fassade des Welfenschlosses in der Detailansicht (Projekt K3)

Dieser Eindruck wird durch die Detailansicht der Punktwolke in Abbildung 10.3 bestätigt, in der verschiedene Details der kinematisch erfassten Fassade zu erkennen sind. Auch hier wird die bereits diskutierte Problematik der systematischen Effekte in den berechneten Azimuten deutlich, die durch hochfrequente Fahrzeugbewegungen hervorgerufen werden (Kapitel 9.3.3, Seite 133). Diese Effekte können nur durch den Einsatz des Systems auf Fahrzeugen mit niederfrequenteren Eigenbewegungen oder durch eine vollständige Erfassung der Nick- und Rollbewegungen vermieden werden.

Die in Tabelle 10.2 genannten Parameter dieses Scans verdeutlichen insbesondere die erheblichen Datenmengen, die im Rahmen einer kinematischen Objekterfassung mit anschließender Georeferenzierung entstehen.

10.4 Nienburger Straße

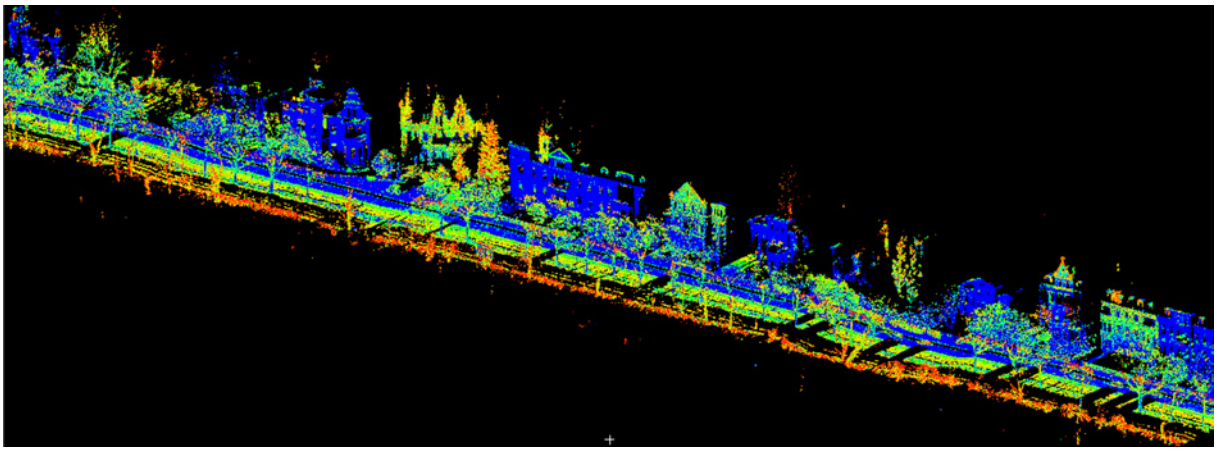


Abbildung 10.4: Nienburger Straße (Ausschnitt)

Da das entwickelte Mapping-System in erster Linie auf die Erfassung langgestreckter Objekte ausgerichtet ist, soll zudem ein Vergleich anhand einer exemplarischen Objekterfassung entlang der Nienburger Straße erfolgen, der eine Länge von insgesamt 610 m besitzt. In diesem Fall wurde die zu realisierende Auflösung auf 0.05 m erhöht, die Genauigkeitsanforderung lag unverändert bei 0.2 m.

Parameter	**S4**	**K4 (2007)**
Scanmodus	statisch	kinematisch
Objektauflösung (Punktabstand)[1]	Sehr hoch (< 3 cm)	Hoch (4.8 cm)
Anzahl Scanpunkte	-	43.5 Mio
Datenvolumen[4]	-	1.6 GByte[4]
Anzahl Standpunkte	15	-
Anzahl Passpunkte	75	-
Passpunkte		
- Einrichtung	120 min	-
- Tachymetrische Bestimmung	60	-
Standpunkt (Einzeln/Gesamt)		
- Objekt- und Passpunktscan	(10/150) min	8 min
- Umbau auf nächsten Standpunkt	(3/45) min	-
Auswertung		
- Standpunktverknüpfung	210 min	-
- GPS-Auswertung	-	5 min
- Trajektorie und Punktwolke[2]	-	106 min
Summe (bezogen auf S2)	625 min (100%)	119 min (19%)

[1] In Fahrtrichtung; [2] Rechner: Pentium 4, 3.4 GHz, 1 GB RAM

[3] Im Unterschied zu Tabelle 4.3 ist hier das Datenvolumen der Punktwolke angegeben

Tabelle 10.3: Erfassungsaufwand für das Projekt „Nienburger Straße“

Der in Tabelle 10.3 ermittelte Zeitbedarf macht deutlich, dass die Stärken der kinematischen Lösung bei Projekten dieser Art voll zum Tragen kommen. Um die geforderte Genauigkeit der Punktwolke von 0.2 m zu gewährleisten, ist für die Verknüpfung statisch gescannter Aufnahmen die zusätzliche Bestimmung ausgewählter Passpunkte mit Hilfe von Tachymetern notwendig, um systematische Abweichungen an den Rändern der Punktwolke zu vermeiden. Darüber hinaus ist die durch statische Scans erfasste Punktwolke weder lage- noch höhenmäßig referenziert, was nur durch den zeitaufwendigen Anschluss an

ein Festpunktfeld erfolgen kann. Theoretisch kann bei den statischen Aufnahmen auf die Einrichtung von Passpunkten vollständig verzichtet werden, wenn die einzelnen Standpunkte mit hohen oder sehr hohen Scanauflösungen erfasst werden, so dass natürlich Objektpunkte zur Verknüpfung dienen können.

Insgesamt ergibt sich durch den Einsatz des kinematischen Scanverfahrens bei vergleichsweise hoher Objektauflösung eine Verminderung des Zeitaufwands von 81% bezogen auf die statische Erfassung. Darüber hinaus ist es möglich, den Zeitvorteil der kinematischen Objekterfassung für dieses Beispielprojekt bei einer um 50% verminderten Auflösung der Punktwolke in Längsrichtung auf mehr als 90% zu steigern.

Ein Teil des kinematisch erfassten Streckenabschnitts im Verlauf der Nienburger Straße ist in Abbildung 10.5 in der Detailansicht dargestellt.

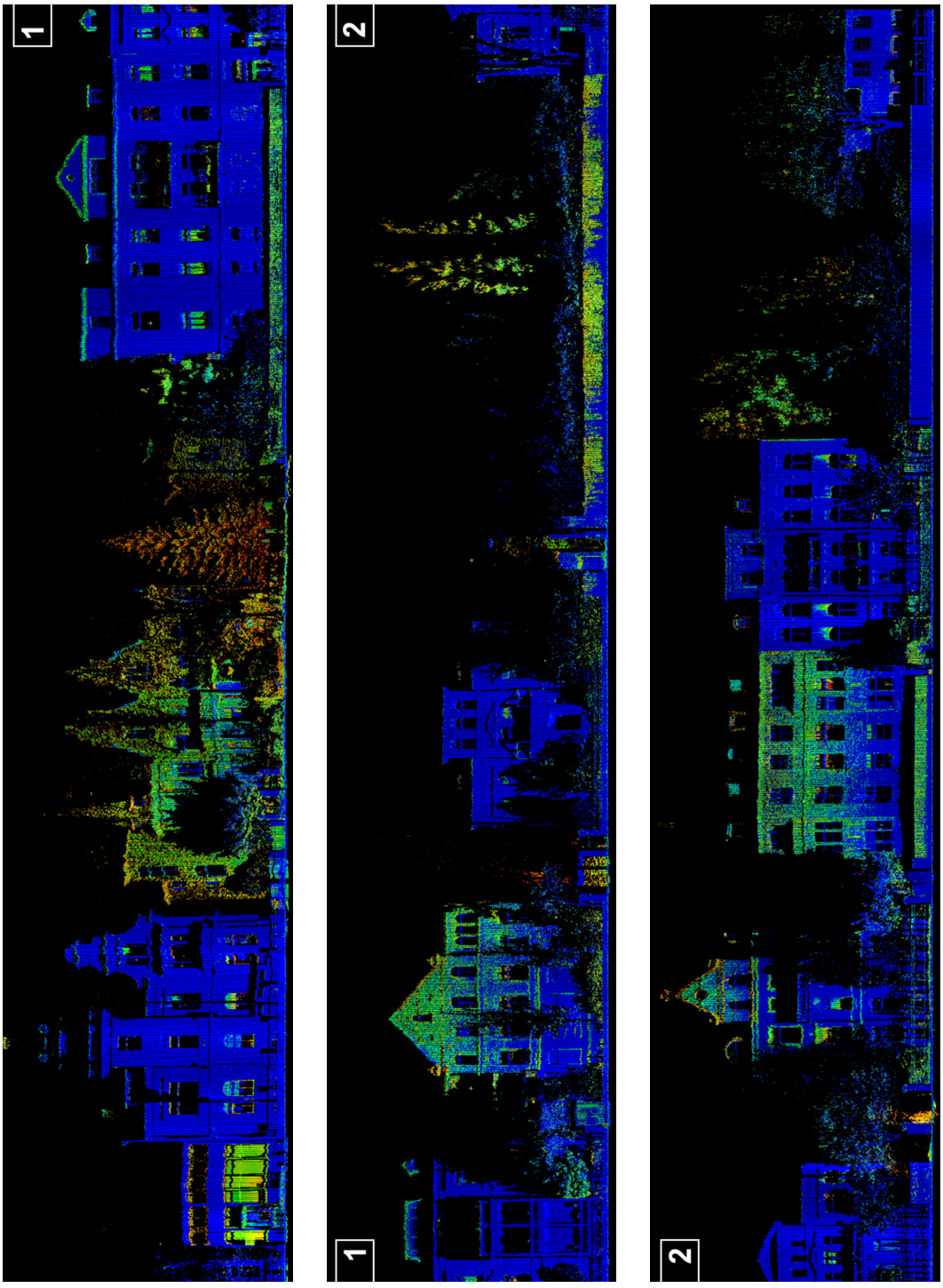


Abbildung 10.5: Nienburger Straße (Ausschnitt)

10.5 Steigerung der Effektivität durch Echtzeiterfassung

Aus den zeitlichen Abschätzungen der Kapitel 10.2 und 10.4 ist deutlich zu ersehen, dass die Vorteile einer statischen Aufnahme in erster Linie bei der flächenhaften Objekterfassung von wenigen Standpunkten aus zum Tragen kommen, da hierbei die Einrichtung von Passpunkten sowie der zeitaufwendige Standpunktwechsel weniger starken Einfluss auf die Gesamtdauer besitzen. Aus Effizienzgesichtspunkten ergibt sich somit durch den Einsatz des in dieser Arbeit vorgestellten kinematischen Scanverfahrens eine signifikante Verbesserung.

Zusätzlich zur Effizienz des Mapping-Systems soll im Folgenden auch seine Effektivität hinsichtlich verschiedener Erfassungsaufgaben diskutiert werden, die durch den Grad der Erfüllung einer definierten Zielvorgabe charakterisiert wird. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Möglichkeit einer Objekterfassung in Echtzeit zu betrachten, die durch den hohen Automatisierungsgrad der kinematischen Objekterfassung auf Systemebene grundsätzlich möglich ist.

In Anlehnung an den bereits in Kapitel 5.2.1 definierten Begriff der Echtzeit ist eine mögliche Echtzeitfähigkeit des entwickelten Systems kontextabhängig zu betrachten. So ist die Erfassung von Umgebungsinformationen als Datenbasis für Kfz-basierte Fahrerassistenzsysteme mit zulässigen Verzögerungen von wenigen Millisekunden verbunden. Die Aufnahme ausgedehnter Unfallstellen oder Gefahrensituationen zur zeitnahen Koordinierung und Planung örtlicher Rettungsarbeiten und Bergungsarbeiten bedingt demgegenüber Zeitanforderungen im Bereich weniger Minuten. Bezogen auf die möglichen Einsatzbereiche des entwickelten Systems sollen im Folgenden nur Verzögerungen betrachtet werden, die sich in einer Größenordnung von mehr als einer Sekunde auswirken.

Wird die Spanne zwischen dem Erfassungszeitpunkt eines Scanprofils vor Ort und dem Vorliegen der vollständig transformierten und georeferenzierten Objektpunkte dieses Profils als Latenzzeit des Mobile-Mapping-Systems $\Delta_{L,MMS}$ definiert, so ergeben sich die in Tabelle 10.4 aufgeführten Anteile an der vorhandenen Latenz.

Modul	Latenzanteil	Begründung
Software		
- Glättung	Rest-Scandauer	Sowohl der Vorwärts-Rückwärts-Kalmanfilter als auch der RTS-Algorithmus benötigen zur Glättung den gesamten Datenbestand (vgl. Kapitel 3.5.1)
- Transformation	5.5 s - 32.5 s	Die zur Transformation der Profile benötigte Rechenzeit ist direkt vom Datenvolumen und somit von der Auflösung abhängig. Sie wird als Latenzzeit pro Sekunde Scandaten angegeben. Die angegebenen Latenzen sind aus den Beispielprojekten abgeleitet.
Messhardware		
- GPS	$>>$ Rest-Scandauer	Die GPS-Trajektorie wird differentiell im Postprocessing mit VRS-Daten des SAPOS-Netzes berechnet. Nach Eingang der Daten werden 5 min für die Auswertung benötigt.
- Scanner	Rest-Scandauer; < 3 s (Rohdaten)	Vor der Speicherung der Rohdaten auf dem angeschlossenen Rechner erfolgt eine Datenaufbereitung im Scanner.
- Echtzeitrechner	< 5 s	Zur Entlastung des Echtzeitrechners werden die Daten in größeren Blöcken übertragen. Der Periodenabstand der Übertragungen, der von der Frequenz des Signals abhängig ist, beträgt bei diesem Prototypen < 10 s

Tabelle 10.4: Anteile der Module an der Latenzzeit des Systems

Diese Zusammenstellung verdeutlicht, dass die Echtzeitfähigkeit des entwickelten Prototypen sowohl durch messtechnische als auch auswertetechnische Randbedingungen beschränkt wird. Die durch den Echtzeitrechner sowie die Transformation der Profildaten verursachten Verzögerungen $\Delta_{L,RT-PC}$ und $\Delta_{L,Scanner}$ können durch eine Erweiterung der Mess- und Auswerterechner um zusätzliche Prozessoren und Optimierung der Auswertealgorithmen weiter verringert werden. Demgegenüber besteht im Hinblick

auf die Glättung der Trajektorie und die GPS-Auswertung eine konzeptionelle Beschränkung der Echtzeitfähigkeit des Systems. In diesen Fällen ist eine weitere Reduzierung der Latenzzeiten nur durch den Übergang auf alternative Algorithmen und Auswerteverfahren zu erreichen.

Zur Bestimmung der befahrenen Trajektorie in Echtzeit kann der Hochpräzise Echtzeitpositionierungs-Service des SAPOS-Netzes (SAPOS-HEPS) genutzt werden, der Korrekturdaten über den Mobilfunkstandard GSM (Global System for Mobile Communications) oder eine Internetverbindung zur differentiellen Punktbestimmung mit GPS anbietet. Die bei der Verwendung von SAPOS-HEPS zugesicherten Latenzzeiten $\Delta_{L,RT-PC}$ liegen in einem Bereich von deutlich unterhalb 1 s. Die erzielbare Genauigkeit der in Echtzeit bestimmten Raumpositionen wird von Illner und Knöpfler (2007) für die horizontalen Koordinatenrichtungen aufgrund empirischer Untersuchungen mit

$$\sigma_{XY,HEPS} \leq 2 \text{ cm}$$

im Vergleich zu $\sigma_{XY,GPPS} < 1$ cm mit SAPOS-GPPS angegeben. Schwerer wiegt in diesem Zusammenhang die maximal verfügbare Datenrate von 1 Hz, die zu zehnfach größeren Punktabständen der GPS-Positionen führt und somit insbesondere die Trajektorienbestimmung bei Kurvenfahrten erschwert.

Neben dem Auswerteverfahren der GPS-Messungen können auch die in Kapitel 3.5.1 vorgestellten Algorithmen zur Glättung der Trajektorie beim Übergang auf ein Echtzeitsystem nicht weiter verwendet werden, da diese die Kenntnis von Daten voraussetzen, die aus zeitlicher Sicht hinter der zu glättenden Epoche liegen. Zwar werden die Raumwinkel bereits mit Hilfe des Kalman-Filters im Rahmen der Vorwärtsfilterung bestimmt, die ausschließlich Daten aus vergangenen Epochen benötigt, jedoch sind diese deutlich weniger gut geglättet als die Ausgangsdaten des RTS-Algorithmus. Da die Qualität der Glättung der Azimute, wie in den Kapiteln 9.4.1 und 9.3.4 gezeigt wurde, einen erheblichen Einfluss auf die innere Genauigkeit der Punktwolke besitzt, stellt der Verzicht auf leistungsfähige Glättungsverfahren die bedeutendste Einschränkung des Systems bei einer Objekterfassung in Echtzeit dar.

Auch die im vorliegenden Ansatz notwendige Umwandlung der Scandaten vom Binär- ins ASCII-Format kann erst nach Abschluss des Scanvorgangs durchgeführt werden. Hierbei ist es jedoch möglich, über Bibliotheksfunktionen des Herstellers direkt auf die binären Rohdaten zuzugreifen und eine zeitnahe Transformation der Scanprofile umzusetzen. Die verbleibende Latenzzeit $\Delta_{L,Scanner}$ ist ausschließlich durch eine Vorauswertung der Daten und Anbringung von Korrekturparametern sowie die Latenz der Schnittstelle begründet und liegt unterhalb von 3 s.

Ausgehend von den vorangegangenen Betrachtungen kann festgehalten werden, dass sowohl die Datenerfassung als auch die Erstellung der dreidimensionalen Punktwolke grundsätzlich in Echtzeit erfolgen kann. Unter der Voraussetzung, dass eine Erweiterung der Mess- und Auswerterechner um zusätzliche Prozessoren erfolgt und die Profilscans mit niedriger Auflösung durchgeführt werden, kann die realisierbare Latenzzeit des Mobile-Mapping-Systems $\Delta_{L,MMS}$ unter Anwendung der diskutierten Modifikationen auf der Grundlage folgender Parameter bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \Delta_{L,MMS} &< \Delta_{L,RT-PC} + \Delta_{L,Scanner} + \Delta_{L,Trafo} + \Delta_{L,HEPS} \\ \Delta_{L,MMS} &< 5 \text{ s} + 3 \text{ s} + 5.5 \text{ s} + 1 \text{ s} \end{aligned} \tag{10.1}$$

Die zu erwartende Latenzzeit des Mapping-Systems bei Verwendung echtzeitfähiger Module beträgt somit $\Delta_{L,MMS} < 14.5\ s$. Eine konkrete Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeitsverluste kann an dieser Stelle mit Hinweis auf die starke Abhängigkeit der Genauigkeit von der Bestimmung der räumlichen Orientierungsparameter nicht abschließend gegeben werden und sollte im Rahmen empirischer Untersuchungen ermittelt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Überführung der entwickelten Prototypen in ein echtzeitfähiges Messsystem mit Latenzzeiten für die Erstellung einer dreidimensionalen Objektpunktwolke von weniger als 15 Sekunden möglich ist. Unter diesem Gesichtspunkt kann neben der bereits nachgewiesenen Effizienzsteigerung auch von einer Erhöhung der Effektivität im Vergleich zum statischen Scanverfahren gesprochen werden, da bei statischen Scans keine Möglichkeit zur Echtzeiterfassung von Objekten gegeben ist.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Problemstellung

Die Erfassung der Erdoberfläche sowie der mit ihr verbundenen Bauwerke und Topographie stellt seit jeher eine der zentralen Aufgaben der Geodäsie dar. Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung von Geodaten in Geoinformationssystemen besteht eine starke Nachfrage nach Verfahren zur schnellen und vollständigen Erhebung dieser Informationen. Die Nutzer dieser Daten finden sich sowohl in öffentlichen Verwaltungen, bei kommunalen und privaten Planungsträgern als auch bei privatwirtschaftlichen Anwendern wie Bauträgern und Projektentwicklungsgesellschaften. Darüber hinaus besteht insbesondere im Bereich der Unfallstellendokumentation der Bedarf an einer vollständigen und möglichst schnellen Erfassung räumlich begrenzter Gebiete im Außenbereich.

Aktuelle Mobile-Mapping-Systeme, die für Aufgaben dieser Art zum Einsatz kommen, sind in der Lage, eine Umgebungserfassung mit hoher Auflösung und Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h durchzuführen. Sie basieren überwiegend auf photo- und videogrammetrischen Sensoren zur Bilderfassung und nutzen inertiale Sensoren zur Bestimmung von Position und Orientierung. In neueren Entwicklungen kommen zudem profilmessende Laserscanner zur Bestimmung verschiedener Parameter wie der Fahrbahnquerneigung zum Einsatz. Der wesentliche Nachteil hinsichtlich der Verwendung einer passiv abtastenden bildgebenden Sensorik ist die große Abhängigkeit von äußeren Umgebungsbedingungen und strukturierten Oberflächen zur Ableitung von Punktkoordinaten. Eine wirtschaftliche Erfassung von Bestandsdaten wird vor allem durch den geringen Automatisierungsgrad gebräuchlicher Mapping-Systeme erschwert. Zwar bieten die eingesetzten inertialen Messsysteme hohe bis sehr hohe absolute Genauigkeiten, erfordern jedoch Investitionskosten von zum Teil deutlich mehr als 100000 € .

Terrestrische Laserscanner sind aufgrund ihres aktiv abtastenden Messprinzips prinzipiell in der Lage, eine Reihe dieser Nachteile zu kompensieren, besitzen auf der anderen Seite jedoch erheblich längere Integrationszeiten zur Erfassung flächenhafter Informationen, so dass sie bislang nur wenig Verwendung in Mobile-Mapping-Systemen finden. Existierende Lösungen verwenden häufig profilmessende Laserscanner, die aufgrund der geringen Auflösung vornehmlich zur Dokumentation von Straßenprofilen und nicht zur bildhaften Erfassung von Objekten genutzt werden.

Lösungsvorschlag

Ausgehend von dieser Problemstellung bestand die Aufgabe der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung und Evaluierung eines Prototypen zur schnellen und hochauflösenden Umgebungserfassung im Außenbereich. Die zu entwickelnde Lösung sollte geeignet sein, Objekte mit einer Genauigkeit von besser als 0.2 m und weitgehend unabhängig von vorherrschenden Umgebungsbedingungen zu erfassen. Als zentraler Sensor zur Objekterfassung soll ein profilmessender terrestrischer Laserscanner bei gleichzeitigem Verzicht auf kostenintensive inertiale Messhardware zum Einsatz kommen. Das System sollte kompakt und flexibel einsetzbar sein und nach Möglichkeit (geodätische) Standardsensoren wie GPS-Empfänger und Inklinometer zur Bestimmung von Position und Raumwinkeln verwenden.

Aufgrund der helixförmigen Abtastung der Objekte ist es notwendig, neben der zeitvarianten Scannerposition auch die entsprechenden Gier-, Nick- und Rollwinkel des Systems zu bestimmen, die zur Transformation der zweidimensionalen Profilmessungen in die dreidimensionale Punktwolke benötigt werden. Während Nick- und Rollwinkel grundsätzlich über Inklinometermessungen bestimmt werden können, ist der Gierwinkel des Fahrzeuges aus der mit GPS-Beobachtungen bestimmten Trajektorie abzuleiten.

Um eine Zuordnung der Erfassungszeitpunkte von Scannerdaten zu der durch GPS-Messungen bestimmten Raumposition sowie den dazugehörigen Gier-, Nick- und Rollwinkeln vornehmen zu können, wurde ein echtzeitfähiger Messrechner mit digitalen, analogen und seriellen Eingängen verwendet. Durch den Einsatz eines preemptiven und multitaskingfähigen Echtzeitbetriebssystems konnten den einzelnen Datenquellen unterschiedlichen Task-Prioritäten entsprechend ihrer Relevanz für die Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen zugewiesen werden.

Die Bestimmung des Gierwinkels wurde mit Hilfe der dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektoren realisiert, die den Bewegungsvektor des Fahrzeuges im Raum aufspannen. Diese wurden durch Filterung der Trajektorie im kinematischen Kalman-Filter aus dem Zustandsvektor jeder Epoche abgeleitet. Die indirekte Bestimmung der Orientierungsparameter im Kalman-Filter bietet gegenüber der direkten Messung den Vorteil, dass die Raumwinkel nicht nur für die äquidistanten Epochen der GPS-Beobachtungen ausgeglichen, sondern auch für die Erfassungszeitpunkte der Scannerdaten prädiziert werden können.

Da die GPS-Beobachtungen somit nicht nur zur Bestimmung der Raumposition, sondern auch zur Ermittlung des Gier- und optional des Nickwinkels beitragen, sind vergleichsweise hohe Genauigkeitsanforderungen an diese Sensorkomponente zu stellen. Eine Auswertung der GPS-Beobachtungen erfolgte aus diesem Grund durch kinematische Einzelpunktpositionierung unter Zuhilfenahme einer virtuellen Referenzstation des SAPOS-Netzes, wodurch unter guten Empfangsbedingungen Genauigkeiten von wenigen Zentimetern für die ermittelten Raumpositionen realisierbar sind.

Zusätzlich zur Filterung der Messwerte im Kalman-Filter erfolgte eine abschließende Glättung der Positionsdaten und der daraus abgeleiteten Geschwindigkeitsvektoren mit Hilfe eines RTS-Algorithmus. Eine solche Glättung trägt insbesondere zur Verbesserung der lokalen Genauigkeiten der Punktwolke bei, da geringe systematische Abweichungen der GPS-Positionen aufgrund des Extrapolationseffektes des Azimutes vergleichsweise große Verzerrungen in seitlich entfernten Bereichen der Punktwolke hervorrufen.

Auch im Rahmen dieser Arbeit wurden die in der geodätischen Messpraxis obligatorischen Kalibrierungen durchgeführt, um einen funktionalen Zusammenhang zwischen verschiedenen Einflussgrößen und den durch sie hervorgerufenen systematischen Effekten der Ergebnisgrößen herstellen zu können. Hierbei wurden sowohl mechanisch begründete Abweichungen der Sensorachsen als auch die Abhängigkeit von Temperatureinflüssen im Rahmen von Komponentenkalibrierungen bestimmt.

Systemevaluierung

Im Rahmen einer abschließenden Evaluierung wurde der entwickelte Prototyp hinsichtlich der Qualität der erfassten Daten sowie der erzielbaren relativen und absoluten Genauigkeiten im Objektraum durch Vergleichsmessungen in unterschiedlichen Testumgebungen untersucht. Hierbei ist zu bedenken, dass das System aufgrund der reduzierten Sensorik auf einen ausreichenden GPS-Empfang angewiesen ist und somit weniger gut für den Einsatz in Straßenschluchten oder gar Tunnelbauwerken geeignet ist.

Es stellte sich heraus, dass fahrdynamische Effekte, die zu periodischen Rollbewegungen des Fahrzeuges führen, vom verwendeten Inklinometer aufgrund der auftretenden Querbeschleunigungen nicht korrekt erfasst werden und somit zu unkompensierten systematischen Effekten innerhalb der Fahrzeugtrajektorie führen. Durch die Ableitung des Gierwinkels aus dem Zustandsvektor des Kalman-Filters werden diese Periodizitäten zum Teil auf die Punktwolke übertragen. Effekte dieser Art entstehen aufgrund des geforderten Verzichts auf inertiale Sensoren und können selbst durch den Einsatz hochwertiger Sensorik nicht vollständig ausgeschaltet werden. Der entwickelte Prototyp sollte somit in der vorliegenden Konfiguration nicht für Anwendungszwecke eingesetzt werden, in denen Situationen mit hoher Fahrdynamik zu erwarten sind. An dieser Stelle sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine Umgebungserfassung mit terrestrischen Laserscannern durch die aktuell verfügbaren Profilfrequenzen von bis zu 50 Hz nur mit Fahrtgeschwindigkeiten von bis zu 50 km/h sinnvoll ist, da die Vorteile des entwickelten Systems im Vergleich zu konkurrierenden Mapping-Systemen ansonsten nicht zum Tragen kommen.

Zur empirischen Bestimmung der inneren Systemgenauigkeit wurde eine Beispielumgebung mit insgesamt 68 Objektpunkten durch getrennte Messungen im Hin- und Rückweg von einer ebenen Fahrbahn aus erfasst. Die mit einer dreidimensionalen Helmert-Transformation ermittelten Restklaffungen zwischen beiden Aufnahmen betrugen für Objektpunkte in einer Entfernung von 25 m weniger als 0.1 m, für Objekte bis 7.5 m sogar weniger als 0.05 m. Die Restklaffungen in der Höhenkomponente lagen für alle Objekte sogar unterhalb von 0.05 m. Es bleibt festzustellen, dass die erzielten Genauigkeiten erfreulicherweise erheblich unterhalb der geforderten Grenzen liegen, was zum einen auf gute GPS-Empfangsbedingungen und zum anderen auf die Ebenheit der vorhandenen Fahrbahnoberfläche zurückzuführen ist.

Die äußere Genauigkeit der mit dem System bestimmten Objektpunktkoordinaten im übergeordneten Bezugssystem wurde mit einem GPS-Rover und dem GPPS-Dienst des SAPOS-Netzes in einer Postprocessing-Auswertung bestimmt. Der Vergleich, der über acht identische Punkte in Form von ebenen Zielmarken vorgenommen wurde, ergab maximale Abweichungen von bis zu 4.2 cm, wobei zwei Punkte aufgrund ihrer Lage unter Bäumen von starken Abschattung des GPS-Signals betroffen waren, und für diesen Vergleich nicht verwendet wurden. Auch hier waren die ermittelten Genauigkeiten des Systems deutlich besser als erwartet, was auf ähnliche Gründe wie bei den Messungen zur inneren Genauigkeit zurückzuführen ist. Inwieweit sich die Ergebnisse des Systems unter realen Bedingungen im öffentlichen Straßenraum bestätigen lassen, kann an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden. Der Grund hierfür liegt nicht zuletzt in praktischen Nachteilen wie den hochfrequenten Eigenbewegungen des realisierten Prototyps, die einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Messwerte besitzen und beim Einsatz auf einer Kfz-gebundenen Plattform nicht in dieser Größenordnung zu erwarten sind.

Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Im Rahmen der durchgeführten Validierung wurde gezeigt, dass die vollständige Bestimmung von Position und Orientierungselementen des entwickelten Prototyps ausschließlich mit satellitengeodätischen Verfahren sowie einem flüssigkeitsbasierten Neigungsmesser möglich, aber durch verschiedene Rahmenbedingungen beschränkt ist. Während die durch den Scanner bedingten Anteile am Genauigkeitsbudget durch die Verwendung der bereits verfügbaren Nachfolgegeneration des Imager 5003 vernachlässigbar klein sind, sollten weiterführende Arbeiten vielmehr an der Problematik der systematisch beeinflussten Trajektorienbestimmung ansetzen. Nur hierdurch können die nachgewiesenen systematischen Effekte durch Fahrzeugbewegungen und Störbeschleunigungen vermindert und die Qualität der Punktwolke erhöht werden.

Weitere Verbesserungen sind unter anderem durch den Einsatz von Neigungsmessern mit einem auf kinematische Anwendungen ausgerichteten Frequenzgang oder durch explizite Messung der auftretenden Beschleunigungswerte erzielbar. In jedem Fall sollte der Übergang auf eine Kfz-gebundene Plattform erfolgen, die zumindest im unteren Geschwindigkeitsbereich verbesserte Eigenschaften hinsichtlich Trägheit, Fahrdynamik und Eigenfrequenzen aufweist. Dies gilt gleichermaßen für die möglichen Erfassungsgeschwindigkeiten des Mobile-Mapping-Systems, da bei einem Einsatz im Straßenraum erhöhte Anforderungen an die Fahrzeuggeschwindigkeit gestellt werden. Die in diesem Fall notwendige Erhöhung der Profilfrequenz des Scanners auf bis zu 50 Hz ist zwar grundsätzlich möglich, benötigt jedoch den Austausch verschiedener Hardwarekomponenten, der ausschließlich vom Hersteller durchgeführt wird.

Ein deutliches Potential zur Steigerung der Genauigkeit ist in dem Ansatz einer zusätzlichen Nutzung von Informationen aus dem Objektraum zu sehen, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht verfolgt wurde. So können die auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme und autonomen Steuerung von Kraftfahrzeugen entwickelten Verfahren zur Spurverfolgung und Detektion von Straßenrändern (Fardi u. a., 2003; Kirchner und Ameling, 2000) grundsätzlich auch im vorliegenden System für die Verbesserung von Fahrzeugposition und Fahrzeugorientierung genutzt werden. Hierdurch lassen sich Elemente wie Fahrbahnmarkierungen zur Stützung der Parameter des Zustandsvektors heranziehen, was insbesondere zur verbesserten Erfassung und rechnerischen Korrektion von Rollbewegungen beitragen kann.

Neben den diskutierten messtechnischen Aspekten sollte darüber hinaus auch die Verfeinerung der eingesetzten Auswerteverfahren angestrebt werden. So wird in der vorliegenden Entwicklungsstufe eine Mindestgeschwindigkeit des Systems für die Erzeugung der dreidimensionalen Punktwolke vorausgesetzt, da das Messrauschen der GPS-Beobachtungen aufgrund der speziellen Form der Azimutbestimmung stets geringer als die Positionsänderung des Fahrzeuges sein muss. Auch ein Übergang zur Modellierung der stochastischen Eigenschaften mit Hilfe der bereits angesprochenen Formfilter-Ansätze ist geeignet, die Qualität der Auswerteergebnisse weiter zu verbessern.

Als Entwicklungsperspektive für die Positionsbestimmung sind innovative Ansätze wie das Precise-Point-Positioning (PPP) zu betrachten, durch die unter Umständen auf die Verwendung von Referenzstationsdaten des SAPOS-Netzes verzichtet werden kann. Unabhängig von den verwendeten Verfahren zur Auswertung der GPS-Beobachtungen kann eine Verbesserung der Zuverlässigkeit dieses Mapping-Systems auch durch die additive Nutzung des russischen Global Navigation Satellite Systems (GLONASS) herbeigeführt werden. Auch wenn die grundlegende Abhängigkeit des Systems von einem ausreichend guten Signalempfang und der geometrischen Satellitenkonfiguration hierdurch bestehen bleibt, scheint eine solche Erweiterung - auch im Hinblick auf die nahende Einführung des europäischen GALILEO-Systems - durchaus vielversprechend zu sein.

Abschließend sei die Möglichkeit einer beschleunigten Transformation der Profilmessungen in den dreidimensionalen Objektraum als weiterer Ansatzpunkt zukünftiger Arbeiten zu nennen, da die PC-basierte Transformation den größten Anteil am gesamten Auswertevorgang besitzt. Dieser wird zwar durch die Implementierung der Algorithmen in der interpretierten Sprache MATLAB vergleichsweise schnell durchgeführt, kann jedoch durch verstärkte Vektorisierung und Überführung der Software in eine kompilierbare Hochsprache wie C++ noch weiter beschleunigt werden, so dass auch der Wirtschaftlichkeitsaspekt ein ernst zu nehmendes Optimierungspotential besitzt.

12 Literaturverzeichnis

[3D Laser Mapping 2007] 3D Laser Mapping: *StreetMapper, Mobile Mapping using LIDAR technology.* Zugriff am 20.02.2007, http://www.3dlasermapping.com/pdf/StreetMapper.pdf. 2007

[Abbott 2003] Abbott, Doug: *Linux for embedded and real-time applications.* Butterworth Heinemann Verlag, 2003. – ISBN 0-7506-7546-2

[AdV 2004] AdV: *SAPOS - Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung.* Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Selbstverlag, Hannover. 2004

[AdV 2005] AdV: *Richtlinien für den einheitlichen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland.* Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Selbstverlag, Hannover. 2005

[Akca 2007] Akca, Devrim: *Least Squares 3D Surface Matching*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Dissertation, 2007

[Alamús u. a. 2004] Alamús, R. ; Baron, A. ; Bosch, E. ; Casacuberta, J. ; Miranda, J. ; Pla, M. ; Sánchez, S. ; Serra, A. ; Talaya, J.: On the Accuracy and Performance of the GEOMÒBIL System. In: *Proceedings of XXth ISPRS Congress, 12.-23.07.2004, Istanbul, Türkei, CD-Rom*, 2004 (International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences)

[Alamús u. a. 2005] Alamús, R. ; Baron, A. ; Casacuberta, J. ; Pla, M. ; Sánchez, S. ; Serra, A. ; Talaya, J.: GEOMÒBIL: ICC land based mobile mapping system for cartographic data capture. In: *Proceedings of the XXII International Cartographic Conference of the ICA, 09.-16.07.2005, La Coruña, Spanien, CD-Rom*, 2005

[Althen 2006] Althen: *AccuStar Einachsiale Elektronische Inklinometer.* Produktinformation, Althen Messtechnik, Selbstverlag, Kelkheim. November 2006

[ANSI 1997] ANSI: *ANSI/EIA/TIA-232-F-1997: Interface between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Terminating Equipment Employing Serial Binary Data Interchange.* American National Standards Institute, Norm. Oktober 1997

[Bailey 2002] Bailey, A.: The place of laser systems within the surveying mix for railway network survey. In: *Civil Engineering Surveyor* (2002), Oktober

[Bechmann u. a. 1962] Bechmann, R. ; Ballato, A. D. ; Lukaszek, T. J.: Frequency Temperature Characteristics of Quartz Resonators Derived from the Temperature Behavior of the Elastic Constants. In: *Proceedings of 16th Annunal Symposium on Frequency Control*, The Institute of Radio Engineers, 1962, S. 77–109

[Beyon 2001] Beyon, Jeffrey Y.: *LabVIEW Programming, Data Acqusition and Analysis.* Prentice Hall, 2001 (National Instruments Virtual Instrumentation Series)

[Bielawski 2000] Bielawski, Leopold-Th.: Aufbau eines Mess-Busses zur Datenerfassung für Kinematische Vermessung. In: Caspary, W. (Hrsg.) ; Heister, H. (Hrsg.) ; Schödlbauer, A. (Hrsg.) ; Welsch, W. (Hrsg.): *25 Jahre Institut für Geodäsie, Teil 1 Wissenschaftliche Beiträge und Berichte, Heft 60-1.* Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr, München, 2000, S. 111–116

[Boehler u. a. 2003] Boehler, W. ; Bordas, M. ; Marbs, A.: Investigating Laser Scanner Accuracy. In: *XIXth Cipa Symposium, 30.09.-04.10.2003, CD-Rom, Antalya, Türkei*, 2003

[Borre 2001] Borre, Kai: The GPS Toolbox. In: *GPS Solutions* 4 (2001), Nr. 3, S. 47–51

[Borre 2003] Borre, Kai: The GPS Easy Suite-Matlab Code for the GPS Newcomer. In: *GPS Solutions* 7 (2003), Nr. 1, S. 47–57

[Bowring 1985] Bowring, B. R.: The Accuracy of Geodetic Latitude and Height Equations. In: *Survey Review* 28 (1985), Nr. 218, S. 202–206

[Brendecke 1987] Brendecke, H.: Temperatur-Sensoren mit mikroprozessorlesbarem Ausgangssignal. In: *Elektronik* 20 (1987), S. 67–70

[Brunner und Woschitz 2001] Brunner, Fritz K. ; Woschitz, H.: Kalibrierung von Messsystemen: Grundlagen und Beispiele. In: Heister, Hansbert (Hrsg.) ; Staiger, Rudolf (Hrsg.): *Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik.* Wittwer Verlag, 2001 (Schriftenreihe des DVW Nr. 42), S. 70–90

[Büttner und Staiger 2007] Büttner, Erik ; Staiger, Rudolf: Erste Untersuchungen des Laserscanners Imager 5006 von Zoller+Fröhlich. In: Luhmann, Thomas (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007, S. 260–269

[Cheok u. a. 2002] Cheok, Geraldine S. ; Leigh, S. ; Rukhin, A.: *Calibration Experiments of a Laser Scanner.* National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6922, Gaithersburg, USA. September 2002

[Clark und Robson 2004] Clark, J. ; Robson, S.: Accuracy of Measurements Made With a Cyrax 2500 Laser Scanner Against Surfaces of Known Colour. In: *Survey Review* 37 (2004), Nr. 294, S. 626–638

[Cohen 1992] Cohen, Clark E.: *Attitude Determination using GPS - Development of an All-Solid State Guidance, Navigation and Control Sensor for Air and Space Vehicles Based on the Global Positioning System*, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Dissertation, 1992

[Deumlich und Staiger 2002] Deumlich, Fritz ; Staiger, Rudolf: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik.* 9. Auflage. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002. – ISBN 3-87907-305-8

[Dijkstra 1965] Dijkstra, E. W.: Solution of a problem in concurrent programming control. In: *Comm. ACM* Bd. 8. New York, USA : ACM Press, 1965, S. 569. – ISSN 0001-0782

[DIN 1999] DIN: *DIN 66020: Funktionelle Anforderungen an die Schnittstellen zwischen Datenendeinrichtung und Datenübertragungseinrichtungen.* Norm, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin. Juli 1999

[DIN 2002] DIN: *DIN 18710 Teil 4: Ingenieurvermessung - Überwachungsmessungen*. Norm (Gelbdruck), Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin. Juli 2002

[Eichhorn 2005] Eichhorn, Andreas: *Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven KALMAN-Filterung*, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen der Universität Stuttgart, Dissertation, 2005

[Eichhorn 2007] Eichhorn, Andreas: Analysis of dynamic deformation processes with adaptive Kalman-Filtering. In: *Journal of Applied Geodesy* 1 (2007), S. 9–15

[El-Sheimy 2005] El-Sheimy, N: An Overview of Mobile Mapping Systems. In: *Proceedings FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Kairo, Ägypten, CD-Rom*, 2005

[El-Sheimy und Schwarz 1993] El-Sheimy, N ; Schwarz, K P.: Kinematic Positioning in Three Dimensions Using CCD Technology. In: *Proceedings of the IEEE - IEE Vehicle Navigation & Information Systems Conference, Ottawa, Kanada*, 1993, S. 472–475

[Evans 1986] Evans, Alan G.: Roll, Pitch, and Yaw Determination Using a Global Positioning System Receiver and an Antenna Periodically Moving in a Plane. In: *Marine Geodesy* 10 (1986), Nr. 1, S. 43–52

[Fardi u. a. 2003] Fardi, B ; Scheunert, U ; Cramer, H ; Wanielik, G: Multi Modal Detection and Parameter-Based Tracking of Road Borders With a Laser Scanner. In: *Proceedings IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2003, S. 95–99

[Fröhlich 1996] Fröhlich, C.: *Aktive Erzeugung korrespondierender Tiefen- und Reflektivitätsbilder und ihre Nutzung zur Umgebungserfassung*, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität München, Dissertation, 1996

[Gander und Hrebícek 2004] Gander, Walter ; Hrebícek, Jiri: *Solving problems in scientific computing using Maple and MATLAB*. 4. Auflage. Springer Verlag, Berlin, 2004. – ISBN 3-540-21127-6

[GeoData 2005] GeoData: *CityScanner Produktdatenblatt*. GeoData Ziviltechniker Gesellschaft mbH, Leoben, Österreich. 2005

[Gertig 1988] Gertig, Udo: Digitales Temperatur-Meßsystem auf Schwingquartzbasis. In: *Chem.-Ing.-Tech.* 60 (1988), S. 896–898

[Glaus 2006] Glaus, Ralph: *Kinematic Track Surveying by Means of a Multi-Sensor Platform*, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Dissertation, April 2006

[Glaus u. a. 2004] Glaus, Ralph ; Lauener, Nathan ; Müller, Urs ; Baumeler, Martin: Der Gleismesswagen swiss trolley: Leistungsmerkmale und Anwendungen. In: *Proceedings of 14th International Conference on Engineering Surveying, 15.-19.03.2004, Zürich, Schweiz*, 2004, S. 27–37

[Goad 1985] Goad, C. C.: Precise relativ position determination using Global Positioning System carrier phase measurements in a nondifferenced mode. In: Goad, C. C. (Hrsg.): *1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, 15.-18.04.1985, Rockville, USA*, 1985, S. 347–356

[Gordon u. a. 2001] Gordon, Stuart ; Lichti, Derek ; Stewart, Mike ; Tsakiri, Maria: Metric Performance of a High-Resolution Laser Scanner. In: El-Hakim, Sabry F. (Hrsg.) ; Grün, Armin (Hrsg.): *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement, 22-23 January 2001, San Jose, USA*, 2001 (Proceedings of SPIE's International Symposium on Electronic Imaging), S. 172–184

[Grejner-Brzezinska und Toth 2002] Grejner-Brzezinska, D ; Toth, C: Real-Time Mobile Multisensor System and its Applications to Highway Mapping. In: *Proceedings of 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 21.-24.05.2002, Berlin*, 2002, S. 202–212

[Grejner-Brzezinska und Yi 2002] Grejner-Brzezinska, D ; Yi, Y: Design and Navigation Performance Analysis of an Experimental GPS/INS/PL System. In: *Proceedings of 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 21.-24.05.2002, Berlin*, 2002, S. 452–461

[Grewal und Andrews 2001] Grewal, Mohinder S. ; Andrews, Angus P.: *Kalman Filtering: Theory and Practice Using Matlab*. 2. Auflage. John Wiley & Sons, New York, USA, 2001

[Gräfe 2003] Gräfe, G.: Mobile Mapping With Laser Scanners Using the MoSES. In: Grün, A. (Hrsg.) ; Kahmen, H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques VI, Zürich, Schweiz* Bd. 1, 2003, S. 381–388

[Gräfe und Heister 2004] Gräfe, G. ; Heister, H.: Kinematische Erfassung des Straßenraumes mit Hilfe von Laserscannern. In: *58. DVW - Seminar Kinematische Messmethoden „Vermessung in Bewegung“*, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, 2004 (Schriftenreihe des DVW Nr. 45), S. 245–264

[Gräfe u. a. 2000] Gräfe, G. ; Klemm, J. ; Sternberg, H.: Das kinematische Vermessungssystem KiSS: Zentrierung der Sensordaten und Transformation in das Fahrzeugsystem. In: *25 Jahre Institut für Geodäsie, Teil 1 Wissenschaftliche Beiträge und Berichte, Heft 60-1* Bd. 60-1. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr, München, 2000, S. 143–154

[GUM 1995] GUM: *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 1st Edition. International Organization for Standardization, 1995. – ISBN 92-67-10188-9

[Hancock u. a. 1998] Hancock, J. ; Langer, D. ; Hebert, M. ; Sullivan, R. ; Ingimarson, D. ; Hoffman, E. ; Mettenleiter, M. ; Fröhlich, C.: Active Laser Radar for High-Performance Measurements. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgien*, Mai 1998, S. 1465–1470

[Haykin 2001] Haykin, Simon: *Kalman Filtering and Neural Networks*. S. 1–22, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2001

[Heister u. a. 1995] Heister, H. ; Caspary, W. ; Hoch, C. ; Klemm, J. ; Sternberg, H.: KiSS, a Hybrid Measuring System for Kinematic Surveying. In: Linkwitz (Hrsg.) ; Hangleiter (Hrsg.): *High Precision Navigation 95*, Dümmler Verlag, Bonn, 1995, S. 561–568

[Heister und Gräfe 2004] Heister, H. ; Gräfe, G.: Projekterfahrungen beim Einsatz der Kinematischen Messsysteme KiSS und MoSES. In: *58. DVW - Seminar Kinematische Messmethoden „Vermessung in Bewegung“*, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, 2004 (Schriftenreihe des DVW Nr. 45), S. 95–112

[Hennes und Ingensand 2000] Hennes, Maria ; Ingensand, Hilmar: Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung. In: Schnädelbach, K. (Hrsg.) ; Schilcher, M. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying, 13.-17.03.2000, München*, 2000, S. 166–177

[Hesse u. a. 2006] Hesse, C. ; Horst, S. ; Neuner, H. ; Heer, R.: A Concept for Monitoring Wind Energy Turbines with Geodetic Techniques. In: *Proceedings of 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Baden, Österreich, CD-ROM*, 2006

[Hesse u. a. 2005] Hesse, C. ; Neuner, H. ; Kutterer, H.: Statistical Analysis of Kinematic Laser Scans. In: Grün, Armin (Hrsg.) ; Kahmen, Heribert (Hrsg.): *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques VII, 03.-05.10.2005, Wien, Österreich* Bd. 1, Oktober 2005, S. 103–112

[Hesse 2006] Hesse, Christian: Neue Entwicklungen im Bereich der kinematischen Datenerfassung. In: *VSVI Seminar Geoinformationssysteme (GIS): Entwicklung - Erfassung - Verwaltung - Präsentation, 01.03.2006, Hannover*, 2006

[Hesse und Kutterer 2006] Hesse, Christian ; Kutterer, Hansjörg: Automated Shape Recognition of Laser Scanned Deformable Objects. In: Sansò, Fernando (Hrsg.) ; Gil, Antonio J. (Hrsg.): *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles, 17.-19.03.2005, Jaen, Spanien* Bd. 131, Springer Verlag, Heidelberg, 2006, S. 103–111

[Hesse und Kutterer 2007] Hesse, Christian ; Kutterer, Hansjörg: A Mobile Mapping System Using Kinematic Terrestrial Laser Scanning (KTLS) for Image Acquisition. In: Gruen, Armin (Hrsg.) ; Kahmen, Heribert (Hrsg.): *Proceedings of 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, 09.-12.07.2005, Zürich, Schweiz, CD-ROM*, 2007, S. II103 – II112

[Hesse und Neumann 2007] Hesse, Christian ; Neumann, Ingo: Automatische Objekterfassung und -modellierung durch kinematisches Laserscanning. In: Luhmann, Thomas (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007, S. 278–288

[Hoch u. a. 1995] Hoch, C. ; Caspary, W. ; Heister, H. ; Klemm, J. ; Sternberg, H.: Architecture and Design of the Kinematic Survey System Kiss. In: Linkwitz (Hrsg.) ; Hangleiter (Hrsg.): *High Precision Navigation 95*, Dümmler Verlag, Bonn, 1995, S. 569–576

[Hofmann-Wellenhof u. a. 2001] Hofmann-Wellenhof, B. ; Lichtenegger, H. ; Collins, J.: *Global Positioning System: Theory and Practice.* 5. Auflage. Springer Verlag, Wien, 2001

[Hofmann-Wellenhof u. a. 2003] Hofmann-Wellenhof, Bernhard ; Legat, K. ; Wieser, M.: *Navigation - Pricples of Positioning and Guidance.* Springer Verlag, Wien, 2003

[Horemuz und Andersson 2006] Horemuz, Milan ; Andersson, Johan V.: Polynomial interpolation of GPS satellite coordinates. In: *GPS Solutions* 10 (2006), Nr. 1, S. 67–72

[Hovenbitzer 2003] Hovenbitzer, Michael: *Zur Automation berührungsloser 3D-Objekterfassung im Nahbereich*, Geodätisches Institut der Technischen Universität Darmstadt, Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Nr. 556, München, 2003

[Iavarone und Martin 2003] Iavarone, A. ; Martin, E.: Calibration Verification Facilities for Long-Range Laser Scanners. In: Grün, Armin (Hrsg.) ; Kahmen, Heribert (Hrsg.): *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques VI, 07.-14.07.2003, Zürich, Schweiz* Bd. 1, 2003, S. 268–278

[Illner und Knöpfler 2007] Illner, Michael ; Knöpfler, Andreas: Exemplarische Untersuchungen zur Genauigkeit des SAPOS-HEPS Dienstes in Baden-Württemberg. In: *GPS und GALILEO, Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen, Beiträge zum 66. DVW-Seminar, 21.-22.02.2007, Darmstadt*, Wißner Verlag, Stuttgart, 2007 (Schriftenreihe des DVW Nr. 49), S. 71–90

[Ingensand 1985] Ingensand, Hilmar: *Ein Beitrag zur Entwicklung und Untersuchung hochgenauer elektronischer Neigungsmeßsysteme für kontinuierliche Messungen*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Dissertation, 1985

[Ingensand 2006] Ingensand, Hilmar: Metrological Aspects in Terrestrial Laser-Scanning Technology. In: *Proceedings on 3rd IAG International Symposium on Geotechnical and Structural Engineering and 12th International Symposium on Deformation Measurements, 22.-24.05.2006, Baden, Österreich, CD-ROM*, 2006

[Ingensand u. a. 2003] Ingensand, Hilmar ; Ryf, Adrian ; Schulz, Thorsten: Performances and Experiences in Terrestrial Laserscanning. In: Grün, Armin (Hrsg.) ; Kahmen, Heribert (Hrsg.): *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques VI, 07.-14.07.2003, Zürich, Schweiz*, 2003, S. I236 – I243

[ISO 1989] ISO: *ISO2110: Information technology; data communication; 25-pole DTE/DCE interface connector and contact number assignments.* International Standards Organization, Norm. 1989

[Johnson und Jennings 2006] Johnson, G. W. ; Jennings, R.: *LabVIEW graphical programming.* 4. Auflage. McGraw-Hill Verlag, New York, USA, 2006. – ISBN 0-07-137001-3

[Kalman 1960] Kalman, Rudolf E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. In: *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering* 82 (1960), S. 35–45

[Kempf und Kuhn 1999] Kempf, Markus ; Kuhn, Bernhard: Der virtuelle Laborant. In: *Linux Magazin* 11 (1999), Linux Magazin Verlag, München, 1999

[Keong und Lachapelle 2000] Keong, Jiunhan ; Lachapelle, Gérard: Heading and Pith Determination Using GPS/GLONASS. In: *GPS Solutions* 3 (2000), Nr. 3, S. 26–36

[Kern 2003] Kern, Fredie: *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2003

[Kersten u. a. 2004] Kersten, Thomas ; Sternberg, Harald ; Mechelke, Klaus ; Acevedo-Pardo, C.: Terrestrial laser scanning system Mensi GS100/GS200 - Accuracy tests, experiences and projects at the Hamburg University of Applied Sciences. In: Maas, H.-G. (Hrsg.) ; Schneider, D. (Hrsg.): *Proceedings of the ISPRS working group V/1 'Panoramic Photogrammetry Workshop', 19-22.02.2004, Dresden, Germany* Bd. XXXIV, PART 5/W16, 2004

[Kirchner und Ameling 2000] Kirchner, A ; Ameling, C: Integrated Obstacle and Road Tracking using a Laser Scanner. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000, Dearborn, USA*, 2000, S. 675–681

[Koch 2004] Koch, Karl-Rudolf: *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*. 4. Auflage. Selbstverlag, Bonn, 2004

[Kruczynski u. a. 1989] Kruczynski, Leonard R. ; Li, Piu C. ; Evans, Alan G. ; Hermann, Bruce R.: Using GPS to Determine Vehicle Attitude: USS Yorktown Test Results. In: *Proceedings of ION GPS-89, 27.-29.09.1989, Colorado Springs, USA*, 1989, S. 163–171

[Kuhlmann 2003] Kuhlmann, H.: Kalman-Filtering with Coloured Measurement Noise for Deformation Analysis. In: *Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, 25.-28.05.2003, Santorini, Griechenland*, 2003, S. 455–462

[Kuhlmann 1996] Kuhlmann, Heiner: *Ein Beitrag zur Überwachung von Brückenbauwerken mit kontinuierlich registrierten Messungen*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 218, Dissertation, 1996

[Lauber und Göhner 1999] Lauber, Rudolf ; Göhner, Peter: *Automatisierungssysteme und -strukturen, Computer- und Bussysteme für die Anlagen- und Produktautomatisierung, Echtzeitprogrammierung und Echtzeitbetriebssysteme, Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik*. 3. Auflage. Springer Verlag, Berlin, 1999. – ISBN 3-540-65318-X

[Leick 2004] Leick, Alfred: *GPS satellite surveying*. 3. Auflage. John Wiley & Sons, New York, USA, 2004. – ISBN 0-471-05930-7

[Lemmens 2004] Lemmens, M.: Product Survey 3D Lasermapping. In: *GIM International - Global Magazine for Geomatics* (2004), Dezember, S. 44–47

[LGN 2007] LGN: *Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) - Digitale Ortophotos aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS)*. Verwendung mit freundlicher Genehmigung der LGN, Hannover. Juni 2007

[Lichti u. a. 2001] Lichti, D. D. ; Stewart, M. P. ; Tsakiri, M. ; Snow, A. J.: Benchmark Testing on a Three-Dimensional Laser Scanning System. In: *Geomatics research Australasia* 72 (2001), S. 1–23

[Liebsch 2007] Liebsch, Gunter: *Geoidgradientenmodell des GCG05 für Niedersachsen*. Unveröffentlicht. 2007. – Persönliche Korrespondenz

[Lindner u. a. 2004] Lindner, Helmut ; Brauer, Harry ; Lehmann, Constans: *Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik*. 8. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004. – ISBN 3-446-22546-3

[Liu und Layland 1973] Liu, C. L. ; Layland, James W.: Scheduling Algorithms for Multiprogramming in a Hard-Real-Time Environment. In: *Journal of ACM* 20 (1973), Nr. 1, S. 46–61. – ISSN 0004-5411

[Mader und Morrison 2002] Mader, Gerald L. ; Morrison, Michael L.: Using Interpolation and Extrapolation Techniques to Yield High Data Rates and Ionosphere Delay Estimates from Continuously Operating GPS Networks. In: *Proceedings of ION GPS 2002, 24.-27.09.2002, Portland, USA*, 2002, S. 2342–2348

[Manandhar und Shibasaki 2000] Manandhar, D ; Shibasaki, R: Geo-Referencing of Multi-Sensor Range Data For Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS). In: *Proceedings of 21st Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Taipei, Taiwan* Bd. 2, 2000, S. 932–937

[Manandhar und Shibasaki 2001a] Manandhar, D ; Shibasaki, R: Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS) - A New Observation System for 3-D Mapping of Urban Areas. In: *Proceedings of IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, 08.-09.11.2001, Rom, Italien*, 2001, S. 5–9

[Manandhar und Shibasaki 2001b] Manandhar, D ; Shibasaki, R: Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS) for 3D GIS. In: *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '01, 10.07.2001, Sydney, Australien*, 2001, S. 2073–2075

[Manandhar und Shibasaki 2002] Manandhar, D ; Shibasaki, R: Auto Extraction of Urban Features From Vehicle-Borne Laser Data. In: *ISPRS Commission IV Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, 08.-12.07.2002, Ottawa, Kanada, CD-ROM*, 2002

[Martin und Vennegeerts 2008] Martin, J. ; Vennegeerts, Harald: Validierung eines TLS-basierten Mobile-Mapping-Systems. In: Luhmann, Thomas (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2008. – im Druck

[Menger 2005] Menger, Dirk: *Untersuchungen zur felduglichen Überprüfung von Laserscannern*, Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover, Diplomarbeit, unveröffentlicht, 2005

[Möhlenbrink 1984] Möhlenbrink, Wolfgang: *Zur Entwicklung eines meßverfahrens für die Bestimmung von Bauwerksverformungen aus Neigungs- und Beschleunigungsmessungen*, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart, Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Nr. 307, München, 1984

[Müller 2007] Müller, Urs: Kinematische Erfassung grosser, linienförmiger Objekte mit Laserscanning. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* 3 (2007), März, Nr. 58, S. 19–22

[Möschwitzer und Lunze 1988] Möschwitzer, Albrecht ; Lunze, Klaus: *Halbleiterelektronik*. 8. Auflage. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1988

[National Instruments 2004] National Instruments: *White Paper 2435: Selecting Your LabVIEW Real-Time Deployment Platform, Produktdarstellung.* Internetdokument, Zugriff am 20.01.2007, http://www.ni.com. 2004

[National Instruments 2006] National Instruments: *NI CompactRIO - Reconfigurable Control and Acquisition System, Produktdarstellung.* Internetdokument, Zugriff am 20.01.2007, http://www.ni.com. 2006

[National Instruments 2007a] National Instruments: *Produktpräsentationen der National Instruments Hardware.* Internetdokument, Zugriff am 20.01.2007, http://www.ni.com. 2007

[National Instruments 2007b] National Instruments: *Selecting Your LabVIEW Real-Time Deployment Platform.* Internetdokument, Zugriff am 22.01.2007, http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4040. 2007

[Neitzel 2006] Neitzel, Frank: Bestimmung von Ziel- und Kippachsenfehler polarer Messsysteme aus Minimalkonfigurationen und überbestimmten Konfigurationen. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv)* 131 (2006), Nr. 3, S. 132–141

[Novak 1990] Novak, K.: Integration of a GPS Receiver and a Stereo-Vision System in a Vehicle. In: *Proceedings of SPIE - Close Range Photogrammetry Meets Machine Vision* Bd. 1395, The International Society for Optical Engineering (SPIE), Zürich, Schweiz, 1990, S. 16–23

[Otte 2005] Otte, Dietmar: 3D-Lasersysteme für die Verkehrsunfallaufnahme zur Erstellung maßstabsgerechter Unfallzeichnungen. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 43 (2005), Nr. 4, S. 85–90

[Paffenholz u. a. 2007] Paffenholz, Jens-André ; Neumann, Ingo ; Kutterer, Hansjörg: Entwicklung eines remote-monitoring Systems für den HDS 4500. In: Luhmann, Thomas (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007, S. 188–195

[Pelzer 1987] Pelzer, Hans: Deformationsuntersuchungen auf der Basis kinematischer Bewegungsmodelle. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 97 (1987), Nr. 2, S. 49–62

[Pelzer 1988] Pelzer, Hans: Anwendung der Kalman-Filtertechnik auf die Deformationsanalyse. In: Schnädelbach, K. (Hrsg.) ; Ebner, H. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 1988 - Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung* Bd. 1, 1988, S. B4/1 – B4/12

[Pfläging 1988] Pfläging, Kurt: Erfahrungen über den Einsatz von kontinuierlich arbeitenden Neigungsmeßeinheiten. In: *Das Markscheidewesen* 95 (1988), Nr. 1, S. 14–17

[Philips 1995] Philips: Integrated Circuits, Family Specifications IC04 / Philips Semiconductors. Januar 1995. – Produktdatenblatt

[Priess 1982] Priess, Ulrich: Schwingquartze als hochauflösende Temeraturfühler. In: *Elektronik* 6 (1982), S. 49–52

[Ramm 2006] Ramm, Kathrin: Enhanced Kinematic Positioning Methods by Shaping Filter Augmentation. In: *Proceedings on 3rd IAG International Symposium on Geotechnical and Structural Engineering and 12th International Symposium on Deformation Measurements, 22.-24.05.2006, Baden, Österreich, CD-ROM*, 2006

[Riegl 2007] Riegl: *RIEGL Laser Measurement Systems GmbH.* Internetpräsentation, Zugriff am 06.01.2007, http://www.riegl.com,. 2007

[Rietdorf 2005] Rietdorf, Andreas: *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*, Fakultät VI - Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften, Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Nr. 582, München, 2005

[Rogers 2000] Rogers, Robert M.: *Applied mathematics in integrated navigation systems.* American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000. – ISBN 1-56347-445-X, 1-56347-397-6

[Saeger u. a. 2007] Saeger, H. ; Ehm, M. ; Fröhlich, C.: Der neue Imager 5006. In: Luhmann, Thomas (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007, S. 361–368

[Santala und Joala 2003] Santala, J. ; Joala, V.: On the Calibration of a Ground-Based Laser Scanner. In: *Proceedings FIG Working Week 2003, 13.-17.04.2003, Paris, Frankreich, CD-ROM*, 2003

[Schaudel 1989] Schaudel, Dieter: Anwendung des Temperatur-Meßsystems QuaT in der Prozesstechnik. In: *Chem.-Ing.-Tech.* 3 (1989), Nr. 61, S. 229–234

[Schödlbauer 1982] Schödlbauer, Albert: *Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung Teil 2*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1982

[Schäfer und Schulz 2005] Schäfer, Thomas ; Schulz, Thorsten: Kalibrierung, Einflussgrößen und Genauigkeiten von Terrestrischen Laserscannern. In: Barth, Wolf (Hrsg.) ; Foppe, Karl (Hrsg.) ; Schäfer, Thomas (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning (TLS) - Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft. Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21.-22.11.2005 in Fulda*, 2005 (Schriftenreihe des DVW Nr. 48), S. 29–50

[Schlemmer 1996] Schlemmer, Harald: *Grundlagen der Sensorik.* Wichmann Verlag, Heidelberg, 1996

[Schmidt und Karl 1988] Schmidt, G. ; Karl, G.: A 3-D Laser Range Camera for Mobile Robot Motion Control. In: *Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'88), 31.10.-02.11.2988, Tokio, Japan*, 1988, S. 605–610

[Schrick 1977] Schrick, Karl-Wilhelm ; Föllinger, Otto (Hrsg.) ; Sartorius, Hans (Hrsg.): *Anwendungen der Kalman-Filter-Technik.* R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1977

[Schulz und Ingensand 2004a] Schulz, Thorsten ; Ingensand, Hilmar: Influencing Variables, Precision and Accuracy of Terrestrial Laser Scanners. In: *Proceedings of the INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, 11.-13.11.2004, Bratislava, Slowakei, CD-ROM*, 2004

[Schulz und Ingensand 2004b] Schulz, Thorsten ; Ingensand, Hilmar: Terrestrial Laser Scanning - Investigations and Apllications for High Precision Scanning. In: *Proceedings of the FIG Working Week, 23.-27.05.2004, Athen, Griechenland, CD-ROM*, 2004

[Schwarz u. a. 1993] Schwarz, K P. ; Martell, H E. ; El-Sheimy, N ; Li, Ron ; Chapman, M A. ; Cosandier, D: VISAT - A mobile highway survey system of high accuracy. In: *Proceedings of the IEEE vehicle navigation and information systems conference, 12.-15.10.1993, Ottawa, Kanada*, 1993, S. 476–481

[Schwarz 2001] Schwarz, Willfried: Geodätische Laborkalibrierung - Stand der Technik. In: Heister, Hans (Hrsg.): *Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, Beiträge zum 54. DVW-Seminar, 19.-20.11.2001, Fulda.* Wittwer Verlag, Stuttgart, 2001 (Schriftenreihe des DVW Nr. 42), S. 70–90

[Schwebel 2002] Schwebel, Robert: Echtzeit unter Linux mit RTAI. In: *Elektronik* 7 (2002), S. 72–77

[Seeber 2003] Seeber, Günter: *Satellite Geodesy.* 2nd Edition. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York, 2003

[Sick GmbH 2007] Sick GmbH: *Produktdarstellung profilmessender Laserscanner, Baureihen Sick LMS und Sick LD.* Internetdarstellung, Zugriff am 03.04.2007, http://www.sick.com. 2007

[Sorcus GmbH 2006] Sorcus GmbH: *Produktpräsentationen der Sorcus Messhardware.* Internetdokument, Zugriff am 10.10.2006, http://www.sorcus.com. 2006

[SpaceTec 2007] SpaceTec: *Profilmessende Laserscansysteme TS2 und TS3.* Internetpräsentation, http://www.spacetec.de/produkte.html, Zugriff am 20.03.2007, Freiburg. 2007

[Staiger 2001] Staiger, Rudolf: Motivation und Strategie zur Prüfung Geodätischer Instrumente. In: Heister, Hans (Hrsg.): *Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, Beiträge zum 54. DVW-Seminar, 19.-20.11.2001, Fulda.* Wittwer Verlag, Stuttgart, 2001 (Schriftenreihe des DVW Nr. 42), S. 70–90

[Staiger 2003] Staiger, Rudolf: Terrestrial Laser Scanning - Technology, Systems and Applications. In: *Proceedings of the 2nd FIG Regional Conference, 02.-05.12.2003, Marrakech, Marokko, CD-ROM*, 2003

[Staiger 2005a] Staiger, Rudolf: The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS). In: *Proceedings of FIG Working Week 2005 and GSDI-8, 16.-21.04.2005, Kairo, Ägypten, CD-ROM*, 2005

[Staiger 2005b] Staiger, Rudolf: Terrestrisches Laserscanning - Eine neue Universalmessmethode? In: Barth, Wolf (Hrsg.) ; Foppe, Karl (Hrsg.) ; Schäfer, Thomas (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning (TLS) - Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft. Beiträge zum 65. DVW-Seminar, 21.-22.11.2005, Fulda*, Wißner Verlag, Stuttgart, 2005 (Schriftenreihe des DVW Nr. 48), S. 3–16

[Staiger und Ettel 2003] Staiger, Rudolf ; Ettel, M.: Untersuchungen des Imager 5003 von Zoller+Fröhlich. In: Seyfert, E. (Hrsg.): *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF), Band 12.* Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, 2003, S. 293–300

[Staiger und Wunderlich 2007] Staiger, Rudolf ; Wunderlich, Thomas: Terrestrisches Laserscanning 2006 - Technische Möglichkeiten und Anwendungen. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv)* 2 (2007), Nr. 132, S. 81–86

[Stephan u. a. 2003] Stephan, A ; Mettenleiter, M ; Härtl, F ; Gemeinder, M ; Heinz, I ; Fröhlich, C: Visuelles Laserradar zur 3D Erfassung und Modellierung realer Umgebungen. Die Digitale Fabrik - Zukunft oder Realität. In: *Mitteilungen des DVW Baden-Württemberg.* 2003 (2), S. 48–59

[Sternberg u. a. 2001] Sternberg, H. ; Caspary, W. ; Heister, H. ; Klemm, J.: Mobile Data Capturing on Roads and Railways Utilizing the Kinematic Survey System KISS. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, 03.-05.01.2001, Kairo, Ägypten, CD-ROM*, 2001

[Sternberg u. a. 2005] Sternberg, Harald ; Kersten, Thomas ; Conseil, Nicole: Untersuchungen des Mensi GS 100 - Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung. In: Luhmann, Thomas (Hrsg.): *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005, S. 56–65. – ISBN 3-87907-420-8

[Talaya u. a. 2004a] Talaya, J. ; Alamús, R. ; Bosch, E. ; Serra, A. ; Kornus, W. ; Baron, A.: Integration of a Terrestrial Laser Scanner with GPS/IMU Orientation Sensors. In: *Proceedings of XXth ISPRS Congress, 12.-23.07.2004, Istanbul, Türkei, CD-Rom*, 2004 (International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences)

[Talaya u. a. 2004b] Talaya, J. ; Bosch, E. ; Alamús, R. ; Serra, A. ; Baron, A.: GEOVAN: The mobile mapping system from the ICC. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2004), Kunming, China, CD-Rom*, 2004

[Tele-Info AG 2004] Tele-Info AG: *Offenlegungsschrift zur Patentanmeldung, Nr. DE102004028736A1.* Deutsches Patent- und Markenamt, München. April 2004

[Tietze und Schenk 1991] Tietze, Ulrich ; Schenk, Christoph: *Electronic circuits : design and applications.* 9. Auflage. Springer Verlag, Berlin, 1991. – ISBN 3-540-19475-4, 0-387-19475-4

[Torge 2003] Torge, Wolfgang: *Geodäsie.* 2. Auflage. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 2003

[Toth und Grejner-Brzezinska 2001] Toth, C ; Grejner-Brzezinska, D: High-Precision Integrated GPS/INS/CCD System for Transportation Applications. In: *Proceedings of the IAG 2001 Scientific Assembly, 02.-07.09.2001, Budapest, Ungarn*, 2001, S. 335–340

[Trimble GmbH 2005] Trimble GmbH: *Trimble 5700/R8 Benutzerhandbuch.* Selbstverlag, Raunheim. 2005

[Trimble GmbH 2007] Trimble GmbH: *Produktdarstellung geodätischer GPS-Empfänger.* Internetdokument, Zugriff am 18.03.2007, http://global.trimble.com/de/. 2007

[Wack u. a. 2003] Wack, R. ; Paar, G. ; Nauschnegg, B. ; Urban, H.: Erzeugung von 3D Stadtmodellen. In: *Proceedings 12. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl, Österreich, CD-ROM*, 2003

[Wanninger 2000a] Wanninger, Lambert: Interpolation von GPS-Beobachtungen. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* 10 (2000), Nr. 107, S. 360–363

[Wanninger 2000b] Wanninger, Lambert: *Präzise Positionierung in Lokalen Referenzstationsnetzen, Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Nr. 508, München*, 2000

[Welsch u. a. 2000] Welsch, W. ; Heunecke, O. ; Kuhlmann, H.: *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen.* Wichmann Verlag, 2000

[Wildi und Glaus 2002] Wildi, Thomas ; Glaus, Ralph: A Multisensor Platform for Kinematic Track Surveying. In: Kahmen, Heribert (Hrsg.) ; Niemeier, Wolfgang (Hrsg.) ; Retscher, Günther (Hrsg.): *Proceedings of 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 21.-24.05.2002, Berlin*, 2002, S. 238–247

[Willgalis 2005] Willgalis, Stefan: *Beiträge zur präzisen Echtzeitpositionierung in GPS-Referenzstationsnetzen*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 255, Dissertation, 2005

[Wilson u. a. 1999] Wilson, K. ; Smith, C. ; Neagley, D. ; Kacyra, B. ; Dimsdale, J. ; Zayhowski, J. J.: CYRAX: A Portable Three-Dimensional Laser-Mapping and Imaging System. In: *Physics Division Progress Report, January 1, 1997 - December 31, 1998.* Los Alamos National Laboratory, Physics Division, 1999, Kap. 2, S. 76–79

[Wirth 2007] Wirth, Holger: Der neue Lichtraummesszug LIMEZ III der Deutschen Bahn AG. In: Barth, Wolf (Hrsg.) ; Foppe, Karl (Hrsg.) ; Schäfer, Thomas (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007) - Ein Messverfahren erobert den Raum. Beiträge zum 74. DVW-Seminar, 05.-06.11.2007, Fulda*, 2007 (Schriftenreihe des DVW Nr. 53), S. 201–215

[Witzak 2000] Witzak, Michael P.: *Echtzeit Betriebssysteme.* Franzis Verlag, Poing, 2000

[Wörn und Brinkschulte 2005] Wörn, Heinz ; Brinkschulte, Uwe: *Echtzeitsysteme.* Springer Verlag, Heidelberg, 2005

[Wübbena 1991] Wübbena, Gerhard: *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 168, Dissertation, 1991

13 Abkürzungsverzeichnis

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAN	Controller Area Network
CCD	Charge Coupled Device
CIN	Code Interface Node
DAQ	Data Acquisition
DC	Gleichstrom (engl.: Direct Current)
DGPS	Differential Global Positioning System
DIN	Deutsche Industrie Norm
EDF	Earliest-Deadline-First-Scheduling
FIFO	First In First OUT
FPGA	Field Programmable Gate Array
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPPS	Geodätischer Präziser Positionierungs-Service
GPS	Global Positioning System
HDS	High Definition Surveying
IC	Integrierter Schaltkreis (engl.: Integrated Circuit)
II-Task	Interrupt-Task von OsX
IMU	Inertial-Mess-System
KiSS	Kinematic Survey System
LFM	Light-Form-Modeler
LLF	Least-Laxity-First-Scheduling
LSB	Least Significant Bit
MDD	Module-Device-Driver
MMI	Man-Machine-Interface
MMS	Mobile-Mapping-System
MoSES	Mobiles Straßen-Erfassungs-System
MSB	Most Significant Bit
NI-Task	Non-Interrupt-Task von OsX
OSX	Echtzeitbetriebssystem der Firma Sorcus
PDT	Program Descriptor Table
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Pulse Per Second
PXI	PCI Extension for Instrumentation
RAM	Random Access Memory
RAMSYS	Rapid-Mapping-System
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
ROM	Read Only Memory
RPC	Remote Procedure Call
RTS	Rauch-Tung-Striebel-Algorithmus
SAPOS	Satelliten Positionierungs Service
SRQ	Service Request
SV	Space Vehicle, Akronym für Satellit
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDT	Task Descriptor Table
TI-Task	Timer-Task von OsX
TLS	Terrestrischer Laserscanner
TMS	Theodolit-Messsystem
TTC	Trimble Total Control
TTL	Transistor-Transistor-Logik
USB	Universal Serial Bus
VI	Virtuelles Instrument von LabVIEW
VKM	Varianz-Kovarianz-Matrix
VLMS	Vehicle Born Laser Mapping Sytsem
WGS84	World Geodetic System von 1984
WLAN	Wireless Local Area Network
ZfH	Zentrum für Hochschulsport der Leibniz Universität Hannover
Z+F	Zoller+Fröhlich

Parameter	**Imager 5003**	**Imager 5006**	**LS880**	**LMS-Z390**	**LD-PS**	**LMS 200**
Hersteller	Zoller+Fröhlich		Faro	Riegl	Sick	
Eindeutigkeitsbereich	53.5 m 25.2 m^2	79 m	76.7 m	100 m / 300 m	34 m	80 m
Entfernungsmessung						
Laserklasse					1	1
Auflösung	16 Bit	0.1 mm	17 Bit		3.9 mm	10 mm
Linearität	$\leq$ 5 mm	$\leq$ 1 mm	3 mm		25 mm	15 mm
Rauschen in 10 m	1.3 mm	0.4 mm	2.6 mm		50 mm[3]	5 mm[3]
Rauschen in 25 m	3.0 mm	1.0 mm	4.2 mm			
Rauschen in 50 m				6 mm		
Temperaturdrift	n.a.[1]	2.5 mm	n.a.			
Laserspot						
Durchmesser in 1 m	3 mm	3 mm	3 mm			10 cm (20 m)
Divergenz	0.22 mrad	0.22 mrad	0.25 mrad	0.25 mrad		
Gesichtsfeld						
Vertikal	310°	310°	320°	80°	360°	180°
Horizontal	360°	360°	360°	360°	-	-
Schrittweite						
Vertikal	0.018°	0.0018°	0.009°	0.002°	0.125°	1°, 0.5°, 0.25°
Horizontal	0.01°	0.0018°	0.00067°	0.002°	-	-
Pixelanzahl						
Vertikal	20.000	200,000	40,000	40,000	2881	721
Horizontal	36.000	200,000	470,000	180,000	-	-
Genauigkeit						
Vertikal	0.02°	0.007°	0.009			
Horizontal	0.02°	0.007°	0.009			
Gewicht	16 kg	14 kg	14 kg	14.5 kg		

Tabelle A.1: Technische Daten ausgewählter terrestrischer Laserscanner

[1] n.a. = nicht angegeben [2] bei verringerter Laserleistung (Close Range) [3] 1σ, ohne Entferungsangabe

B Echtzeitbetriebssysteme in der Übersicht

System	QNX	VxWorks	RTAI	OSX	LabVIEW RT	WindowsCE
Hersteller	QNX Software	WindRiver	-	Sorcus	National Instruments	Microsoft
Lizenz	Kommerz.	Kommerz.	OpenSource	Kommerz.	Kommerz.	Kommerz.
Typ	RTOS	Aufsatz	Aufsatz	RTOS	RTOS	RTOS
Zielsystem	80x86	680x0	80x86	80486	I32	I32
		80x86	PowerPC			PowerPC
		PowerPC				MIPS
		MIPS				ARM
		SPARC				
Hostsystem	QNX	Unix	Linux	Linux	Windows	Windows CE
		Windows		Windows	Linux/Solaris	Windows
Sprache	Watcom C	ANSI-C	ANSI-C	Borland C	G	Visual C++
	C++	C++	C++	C++		Visual Basic
	Assembler	Java	Java	Pascal		Visual J++
		Ada		Assembler		
Dateisystem	Unix	Unix		FAT16		FAT
	FAT	FAT				
	ISO9660					
GUI	X-WIN	X-WIN		-	LabVIEW Front Panel	Windows CE
	QNX-WIN					
Netzwerk	TCP/IP	TCP/IP		TCP/IP	TCP/IP	TCP/IP
	SNMP	SNMP				
ROM-fähig	ja	ja	ja	ja		ja
Scheduling	Preemptiv	Preemptiv	Preemptiv	Preemptiv	Preemptiv	Preemptiv
	Fixed Priority	Fixed Priority	Fixed Priority	Fixed Priority	Fixed Priority	Fixed Priority
	Round Robin	Round Robin			Time Slice	

Tabelle B.1: Uebersicht über Echtzeitbetriebssysteme

Dank

All denjenigen, die mich in vielfältiger Weise bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, möchte ich an dieser Stelle meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Dies gilt insbesondere für Herr Prof. Dr.-Ing.habil. Hansjörg Kutterer für die Übernahme des Referates, die hervorragende Betreuung und seine uneingeschränkte Bereitschaft, in neue Forschungsgebiete vorzustoßen. Sein unerschöpflicher Vorrat an Ideen und Anregungen sowie sein großes persönliches Engagement für wissenschaftliche Fragestellungen haben mich nachhaltig beeindruckt und einen entscheidenden Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing.habil. Christian Heipke für die Übernahme des Korreferates und für seine konstruktiven Anregungen und Vorschläge danken, die diese Arbeit ohne Zweifel abgerundet haben. In gleicher Weise darf ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand von der ETH Zürich meinen Dank für die Übernahme des zweiten Korreferates aussprechen, der mich mit vielen innovativen Ansätzen und einer breiten fachlichen Betrachtungsweise auf angenehme Weise konfrontiert hat.

Meine Dankbarkeit gilt ebenso dem früheren Leiter des Geodätischen Institutes, Herrn Prof. Dr.-Ing.habil. Dr.h.c.mult. Hans Pelzer, der mir nach meinem Studium die Möglichkeit eröffnete, an der Leibniz Universität Hannover wissenschaftlich zu arbeiten.

Ganz besonders bin ich den Kolleginnen und Kollegen vom Geodätischen Institut der Leibniz Universität Hannover verbunden, die für viele Hilfestellungen, eine sehr angenehme Atmosphäre und fünf unvergessliche Jahre gesorgt haben. Ausdrücklich nennen möchte ich an dieser Stelle meine Kollegen Hans Neuner und Ingo Neumann, die mir durch ihre brillianten Ideen den Weg aus einigen Sackgassen ermöglichten. Dies gilt gleichermaßen für Horst Suhre, der durch faszinierende elektronische Schaltungen wesentlichen Anteil an der Erstellung des fertigen Prototypen hat. Auch Harald Vennegeerts und Jens-André Paffenholz gebührt mein aufrichtiger Dank für die Absolvierung einer geschätzten Marathondistanz im Rahmen von Testmessungen in der hannoverschen Nordstadt, auf Parkplätzen, Sportanlagen und dem gesamten Universitätsgelände.

Der Firma Zoller + Fröhlich aus Wangen in Person von Dr. Christoph Fröhlich, Franz Härtl, Jörg Meixner und Markus Ehm gebührt ein ganz spezieller Dank für die hervorragende und stets engagierte Unterstützung zur Fertigstellung des aktuellen Prototypen.

Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Ltd.VmDir. Dieter Kertscher, der mich als Leiter der Behörde für Geoinformation, Landentwicklung und Liegenschaften Braunschweig während meines gesamten Referendariates in hervorragender Weise unterstützt hat. Nicht zuletzt durch ihn war es möglich, diese Arbeit termingerecht fertigzustellen.

Vor allem aber gilt mein persönlicher Dank meiner Lebensgefährtin Sarah Schwiening, die durch ihr unermüdliches Lektorat dieser Arbeit einen wesentlichen Beitrag geleistet hat. Ihr Verständnis, ihre außergewöhnliche Geduld und der mehrjährige Verzicht auf Urlaube und gemeinsame Wochenenden haben das Gelingen dieser Arbeit erst möglich gemacht.

Lebenslauf

Christian Hesse

17.03.1975	Geboren in Bremen

Schulausbildung

1981 - 1985	Grundschule, Wittorf
1985 - 1987	Orientierungsstufe, Visselhövede
1987 - 1994	Ratsgymnasium, Rotenburg (Wümme)

Grundwehrdienst

1994 - 1995	Bundesmarine (FGS Lütjens), Kiel

Berufsausbildung

07/1995 - 09/1995	Dreimonatiges Vorpraktium ÖbVI Ehrhorn, Achim
10/1995 - 03/2000	Studium des Vermessungswesens an der Leibniz Universität Hannover
07/2000 - 09/2000	Projektingenieur ÖbVI Hesse, Buxtehude
10/2000 - 04/2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geodätischen Institut der Leibniz Universität Hannover
05/2006 -	Vermessungsreferendar bei der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Hannover

Sonstige Tätigkeiten

04/2000 - 06/2000	EXPO 2000, Hannover